



Rui Manuel Pereira Jacinto

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica
e de Computadores

Modelação da Propagação numa Rede de Sensores sem Fios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor Luís Filipe Lourenço Bernardo, FCT-UNL
Co-orientador: Doutor Mário José de Monteiro Macedo, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito e Palma
Arguente: Prof. Doutor Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira
Vogais: Prof. Doutor Luís Filipe Lourenço Bernardo
Prof. Doutor Mário José de Monteiro Macedo



Modelação da Propagação numa Rede de Sensores sem Fios
Rui Jacinto



Rui Manuel Pereira Jacinto

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica
e de Computadores

Modelação da Propagação numa Rede de Sensores sem Fios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor Luís Filipe Lourenço Bernardo, FCT-UNL
Co-orientador: Doutor Mário José de Monteiro Macedo, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe Figueira de Brito e Palma
Arguente: Prof. Doutor Rodolfo Alexandre Duarte Oliveira
Vogais: Prof. Doutor Luís Filipe Lourenço Bernardo
Prof. Doutor Mário José de Monteiro Macedo

Modelação da Propagação numa Rede de Sensores sem Fios

“*Copyright*” Todos os direitos reservados a Rui Manuel Pereira Jacinto, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Ao meu filho

AGRADECIMENTOS

Na fase final desta dissertação, é então altura de colocar os agradecimentos a todos os que contribuíram directa e indirectamente para a realização deste trabalho.

Começo por agradecer ao professor Luís Bernardo e ao professor Mário Macedo, por nunca terem desistido de me incentivar e me levar a concluir este trabalho. Agradeço a disponibilidade e as orientações que me forneceram ao longo desta dissertação.

Agradeço o apoio e a tolerância sempre presente à minha namorada, que esteve sempre a “empurrar-me” para bom porto, apesar de todos os contratempos.

Aos meus pais e ao meu irmão, pelo incentivo, compreensão e pelos princípios que toda a minha vida me transmitiram.

Agradeço também a todos os meus colegas de trabalho pelas palavras motivadoras e disponibilidade, que em momentos complicados, me foi bastante útil para a evolução desta dissertação.

Quero também agradecer ao projecto MPSat, PTDC/EEA-TEL/099074/2008 pelo financiamento parcial dos equipamentos usados na tese.

Lisboa, Março 2012

Rui Manuel Pereira Jacinto

RESUMO

As redes de sensores sem fios têm de lidar com todas as adversidades de qualquer rede sem fios. A transmissão de sinais de radiofrequência em ambientes reais está condicionada pelo meio de propagação e por todas as fontes de interferência que possam estar presentes nesse mesmo meio.

Pelo facto de ser extremamente dispendioso e moroso implementar uma rede de sensores sem fios, muitas vezes recorre-se a simuladores para testar o comportamento destas redes. Estes simulam o *hardware* e o ambiente de propagação. Os modelos implementados nos simuladores são modelos simplistas, o que leva a conclusões discrepantes relativamente à propagação dos sinais devido às irregularidades do ambiente de propagação.

Esta dissertação visa contribuir para o melhoramento dos modelos de propagação dos simuladores, para que testes efectuados em ambientes virtuais se possam aproximar mais da realidade. Utilizaram-se dispositivos TelosB, que utilizam o rádio CC2420 cuja frequência de sinal é de 2.4GHz, para estudar a propagação dos sinais numa rede de sensores sem fios.

Este estudo foi efectuado utilizando um protocolo de acesso ao meio desenvolvido de modo a otimizar os recursos dos nós sensores em caso de mobilidade. O protocolo MMH-MAC tem como objectivo que um nó móvel possa rapidamente sincronizar-se com uma rede estática de sensores. Aquando do desenvolvimento deste protocolo, foram obtidos resultados com base no simulador TOSSIM, que além de simular o ambiente de propagação, simulam também o comportamento dos próprios dispositivos. A implementação no *hardware* permite a obtenção de resultados mais fiáveis dado que são consideradas todas as limitações que estes dispositivos podem ter. Esta dissertação contempla também o estudo do desempenho do protocolo MMH-MAC implementado em dispositivos TelosB.

PALAVRAS-CHAVE

Redes de Sensores Sem Fios, Protocolos de Acesso ao Meio, Simulador de Redes sem Fios, Propagação, Perdas de Propagação, Perdas por Desvanecimento

ABSTRACT

The wireless sensor networks have to deal with the odds of any wireless network. The transmission of radio signals in real environments is conditioned by the propagation conditions and all sources of interference that may be present. Wireless sensor network's behavior tests often resort to simulation because it is extremely expensive and time consuming to deploy such a network. While the simulators model the hardware and the propagation environment, they are often simplistic, which leads to disagreeing conclusions regarding the propagation of signals due to irregularities in the propagation environment.

This thesis aims to contribute to the improvement of the propagation models of simulators, allowing testing in virtual environments to be closer to reality. TelosB devices were used, which use a CC2420 radio, with a frequency of 2.4 GHz, for studying the propagation of signals in a wireless sensor network.

This study was conducted using a medium access control protocol developed to optimize the resources of the sensor nodes with node mobility. The MMH-MAC protocol aims to allow the quick synchronization of a mobile node with a network of static sensors. This protocol has been tested using TOSSIM simulator, which in addition to simulate the propagation environment also simulates the behavior of the devices themselves. The results obtained with the hardware implementation are more realistic because they consider all the limitations that these devices may have. This dissertation also includes the study of the performance of MMH-MAC protocol in TelosB devices.

KEYWORDS

Wireless Sensor Networks, Media Access Protocols, Wireless Networks Simulator, Propagation, Path Loss, Fading

ÍNDICE DE MATÉRIAS

CAPÍTULO 1 - Introdução.....	1
1.1.Introdução.....	1
1.2.Enquadramento	2
1.3.Hipótese.....	2
1.4.Objectivos e Contribuições.....	2
1.5.Estrutura da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 - Conceitos	5
2.1.Ambiente de Propagação.....	5
2.2.Zonas de Recepção.....	6
2.3.Métricas para Medição de Qualidade de Sinal	7
2.4.Factores de Irregularidade no Meio de Propagação	9
2.4.1. Impactos	10
2.4.2. Altura da Antena	11
2.4.3. Cobertura Rádio	11
2.4.4. Simetria do Canal Rádio	11
2.4.5. Potência de Transmissão.....	12
2.4.6. Frequência	12
2.4.7. Interferência	12
2.4.8. Tamanho dos Pacotes	13
2.5.Protocolos MAC	13
2.5.1. Protocolos TDMA e CSMA.....	14
2.5.1.1. Protocolos Assíncronos	14
2.5.1.1.1. B-MAC	14
2.5.1.1.2. X-MAC.....	15
2.5.1.1.3. WiseMAC	16
2.5.1.2. Protocolos Síncronos	16
2.5.1.2.1. S-MAC	17
2.5.1.2.2. T-MAC	18
2.5.1.2.3. SCP-MAC.....	18
2.5.1.2.4. MS-MAC	18
2.5.1.3. Protocolos Híbridos	19
2.5.1.3.1. Z-MAC	19
2.5.1.3.2. MH-MAC	19

2.5.1.3.3. MMH-MAC	21
2.5.2. Protocolos Multi-Canal (FDMA)	22
2.5.2.1. TFMAC	22
2.5.2.2. HYMAC	23
2.5.2.3. Y-MAC	23
2.6. Componentes de Hardware e Software	23
2.7. Simuladores	24
2.8. Aplicações	25
CAPÍTULO 3 - Propagação	27
3.1. Mecanismos de Propagação.....	28
3.2. Causas de Atenuação de Sinal	29
3.3. Perdas de Propagação.....	30
3.3.1. <i>Path Loss</i>	31
3.3.2. Grande Escala (Desvanecimento Lento).....	31
3.3.2.1. <i>Shadowing</i>	32
3.3.3. Pequena Escala (Desvanecimento Rápido ou <i>Fast Fading</i>).....	32
3.4. Modelos de Propagação.....	32
3.4.1. Grande Escala.....	33
3.4.1.1. Modelo <i>Free Space</i>	33
3.4.1.2. Modelo <i>Two-Ray</i> (Dois Raios)	34
3.4.1.3. Modelo <i>Log-Distance Path Loss</i> (Log-Distância)	35
3.4.1.4. Modelo <i>Log-Normal Shadowing</i>	35
3.4.1.5. Modelo RIM	36
3.4.2. Pequena Escala.....	37
3.4.2.1. Distribuição de <i>Rayleigh</i>	37
3.4.2.2. <i>Rice</i>	38
3.5. Norma 802.15.4 – Nível Físico.....	38
CAPÍTULO 4 - Protocolo MMH-MAC.....	41
4.1. Introdução.....	41
4.2. Estrutura do Protocolo MMH-MAC	42
4.3. Modo Assíncrono.....	43
4.4. Modo Síncrono	46
4.5. Transição de Modo de Funcionamento	48
4.5.1. Sincronização entre Nós Assíncronos.....	48
4.5.2. Sincronização em <i>Cluster</i> Síncrono.....	50
4.5.3. Dessincronização.....	51

4.5.4. Detecção de Perda de Vizinhança	52
4.5.5. Implementação	52
CAPÍTULO 5 - Análise de Desempenho	55
5.1. Cenário de Testes	55
5.1.1. Material	55
5.1.2. <i>Software</i>	56
5.1.3. Meio de Propagação	57
5.1.4. Implementação da Rede	58
5.2. Resultados	60
5.2.1. Recolha de Resultados	60
5.2.2. Taxa de Recepção de Pacotes	61
5.2.3. Potência Recebida	62
5.2.4. Alcance	63
5.2.5. Modelo de Propagação	64
5.2.5.1. <i>Path Loss Exponent</i>	65
5.2.5.2. Componente de <i>Shadowing Fading</i>	68
5.2.5.3. Resultados Finais	70
5.2.6. Débito	71
5.2.6.1. Assíncrono	71
5.2.6.2. Síncrono	72
5.2.6.3. Conclusão	73
CAPÍTULO 6 - Conclusões	75
6.1. Conclusões	75
6.2. Trabalho Futuro	76
Bibliografia	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Taxa de recepção de pacotes em função da distância em ambiente (a) <i>indoor</i> e (b) <i>outdoor</i> [Zam07].....	7
Figura 2.2 - Processo de sincronização entre nós assíncronos [Ber10].....	21
Figura 2.3 - Processo de sincronização quando o nó fixo se encontra síncrono [Ber10].	22
Figura 3.1 - Imagem representativa do fenómeno de reflexão.	28
Figura 3.2- Imagem representativa do fenómeno de difracção.....	28
Figura 3.3 - Imagem representativa do fenómeno de dispersão.	29
Figura 3.4 - Imagem representativa da propagação multi-caminho.....	29
Figura 3.5 - Desvanecimento lento e desvanecimento rápido [Rap02].....	31
Figura 3.6 - Exemplo de propagação <i>Two-Ray</i>	34
Figura 3.7 - Grau de Irregularidade (DOI) [Zho06].....	36
Figura 3.8 - Canais utilizados na frequência 868MHz (Canal 0).....	39
Figura 3.9 - Canais utilizados na frequência 915MHz (Canal 1 a 10) com espaçamento de 2MHz.	39
Figura 3.10 - Canais utilizados na frequência 2.4GHz (Canal 11 a 26) com espaçamento de 5MHz.	39
Figura 4.1 - Transmissão <i>unicast</i> com os nós a funcionar em modo assíncrono.	44
Figura 4.2 - Transmissão <i>broadcast</i> com nós a funcionar em modo assíncrono.	45
Figura 4.3 - Funcionamento do mecanismo para evitar colisão de preâmbulos.	46
Figura 4.4 - Estrutura de a)trama de <i>slots</i> síncronos b) <i>slot</i> dedicado c) <i>slot</i> público	47
Figura 4.5 - Exemplo de alocação de <i>slots</i> [Ber07].	48
Figura 4.6 - Processo de sincronização quando todos os nós se encontram a operar em modo assíncrono.....	49
Figura 4.7 - Troca de mensagens efectuada no processo de agregação de um nó móvel a um <i>cluster</i> síncrono (método activo).	51
Figura 4.8 - Excerto de código referente ao envio de mensagens desenvolvido para o <i>hardware</i>	53
Figura 4.9 - Excerto de código referente ao envio de mensagens desenvolvido para o simulador.	54
Figura 5.1 - TelosB.[TelosB].....	56
Figura 5.2 - Mapa com local dos testes.	57
Figura 5.3 - Localização do nó receptor.....	58
Figura 5.4 - Fotografia do cenário de testes.	58

Figura 5.5 - Imagem representativa da rede e distâncias ocupadas pelos dois emissores relativamente ao receptor, ligado ao computador.	58
Figura 5.6 - Variação da taxa de recepção de pacotes.....	61
Figura 5.7 - Potência recebida do nó <i>a)</i> fixo e <i>b)</i> móvel e respectivo nível de confiança a 95%.	62
Figura 5.8 - Relação potência <i>vs</i> distância dos Telos [Pol05].	63
Figura 5.9 - Taxa de pacotes recebidos com uma elevação dos nós em 70 centímetros e uma distância de 18 metros entre o nó móvel e o nó receptor.	64
Figura 5.10 - Potência recebida em função de <i>logdd0</i>	66
Figura 5.11 - Recta obtida por regressão linear.	67
Figura 5.12 - Curva de densidade de probabilidade da distribuição Gaussiana.	69
Figura 5.13- Curva de densidade de probabilidade de $X\sigma$	71
Figura 5.14 - <i>Throughput</i> em modo de funcionamento assíncrono.	72
Figura 5.15 - Razão entre o débito e o tamanho do pacote.	72
Figura 5.16 - <i>Throughput</i> em modo de funcionamento síncrono.	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Frequências de operação da norma 802.15.4.....	39
Tabela 5.1 - Valores medidos.	60
Tabela 5.2 - Valores utilizados para o cálculo do modelo de propagação.	65

ACRÓNIMOS

ACK - Acknowledge

BFS - Breadth First Search

B-MAC - Berkeley Media Access Control

CCA - Clear Channel Assessment

CCI - Chip Correlation Indicator

CSMA - Carrier Sense Multiple Access

CTS - Clear To Send

DOI - Degree of Irregularity

FDMA - Frequency Division Multiple Access

LPL - Low Power Listening

LQI - Link Quality Indication

MAC - Medium Access Control

MH-MAC - Multimode Hybrid Medium Access Control

MMH-MAC - Mobile Multimode Hybrid Medium Access Control

MS-MAC - Medium Access Protocol for Sensor Networks

PACK - Preamble Acknowledgement

PRR - Packet Reception Rate

RIM - Radio Irregularity Model

RSSI - Received Signal Strength Indication

RTS - Request To Send

SCP-MAC - Scheduled Channel Polling – Medium Access Control

S-MAC - Sensor - Medium Access Control

SNR - Signal-to-Noise Ratio

SRBit - slot reserve bit

TDMA - Time Division Multiple Access

T-MAC - Timeout - Medium Access Control

WMEWMA - Window Meaning Exponentially Weighted Moving Average

Z-MAC - Zebra Medium Access Control

SYNC - Synchronization

CAPÍTULO 1.

Introdução

1.1. Introdução

A sociedade actual tem observado uma evolução constante das tecnologias. Seja por necessidade ou por lazer, a evolução nas tecnologias tem permitido uma melhor qualidade de vida. Foi também com este propósito que surgiu uma nova tecnologia de baixo custo: os dispositivos de sensores sem fios, pequenos dispositivos que integram diversos componentes de hardware, e que têm como objectivo monitorizar os mais diversos ambientes. Estes dispositivos, quando dispostos convenientemente, formam uma rede de comunicação, onde todos cooperam na obtenção da informação solicitada pelo utilizador final.

Estas redes são dispostas em locais fixos durante longos períodos de tempo, não tendo qualquer intervenção humana durante esse período. Logo, há necessidade de prever o comportamento desta rede, de cada nó e do grupo de nós constituintes da rede.

A previsão do comportamento da rede é efectuada recorrendo a ambientes de estudo, com todas as limitações inerentes. Na maioria das vezes, os estudos são efectuados recorrendo a simuladores, dada a dificuldade de reprodução de cenários reais. Mas nem sempre os simuladores têm a capacidade de emular as características reais, induzindo, por vezes, em erro.

Na presente dissertação, procura-se contribuir para a melhoria da fiabilidade dos modelos de propagação disponíveis nos simuladores, através do estudo do modelo de propagação para um determinado cenário real.

Além do modelo de propagação, procedeu-se também ao estudo do protocolo MMH-MAC em ambiente real, usando hardware físico, em vez de recorrer ao uso de simuladores, como tinha sido efectuado em [Ber10].

1.2. Enquadramento

As redes de sensores sem fios já são parte integrante do nosso quotidiano, e futuramente, maior será a sua expansão a outras áreas. São utilizadas para monitorização ambiental, na prevenção de incêndios, na medicina, na agricultura, entre outros. Como já referido anteriormente, estas redes têm características muito particulares, o que tem incentivado o desenvolvimento de inúmeros protocolos mais adaptados às suas limitações. Estas redes são geralmente dispostas em locais fixos por grandes períodos de tempo. O estudo prévio deve focar o comportamento da rede em cenários idênticos, para que a mesma possa funcionar sem intervenção humana e por longos períodos.

Nesta dissertação procura-se obter um modelo de propagação para um determinado ambiente. Esse modelo, além de poder ser aplicado em simuladores, pode também ser utilizado para a implementação de uma rede num cenário idêntico.

1.3. Hipótese

Apesar da irregularidade dos ambientes de propagação, é possível definir modelos matemáticos que modelam estatisticamente o comportamento que a propagação de um sinal terá para um determinado cenário real.

Recorrendo ao modelo obtido, é possível realizar o estudo do comportamento de uma rede de sensores sem fios através de simuladores.

1.4. Objectivos e Contribuições

Um dos principais objectivos desta dissertação é obter um modelo matemático que define o comportamento da propagação de sinal entre nós TelosB, para uma rede de sensores sem fios específica.

O outro objectivo desta dissertação prende-se com o evidenciar as disparidades entre os resultados de uma rede de sensores sem fios simulada e uma rede real. Pretende-se adaptar o código desenvolvido para simulador aos nós sensores. O principal contributo desta dissertação consiste na caracterização matemática da propagação num cenário real. São obtidos resultados

que permitem melhorar os modelos de propagação aplicados nos simuladores, de forma a modelar o comportamento de ambientes reais.

Foi também reprogramado o protocolo de controlo de acesso ao meio (MAC) MMH-MAC e verificado o seu comportamento num cenário real. Desta forma, validou-se num cenário real o protocolo que tinha sido desenvolvido essencialmente no simulador.

1.5. Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, conforme se resume em seguida.

No capítulo 2 (“Conceitos”) é apresentado um resumo das características inerentes à propagação de sinais cujo meio de propagação é o ar, sendo apresentados os factores de irregularidade no meio. São também apresentados neste capítulo alguns dos protocolos MAC aplicáveis a redes de sensores sem fios.

No capítulo 3 (“Propagação”) é apresentado um estudo teórico mais aprofundado da propagação em ambiente *wireless*, assim como alguns modelos matemáticos capazes de descrever o comportamento do mecanismo de propagação.

No capítulo 4 (“Protocolo MMH-MAC”) é apresentado o protocolo MMH-MAC no modo de funcionamento síncrono, assíncrono e a transição de assíncrono para síncrono.

No capítulo 5 (“Análise de desempenho”) são apresentados os valores obtidos, assim como a manipulação que foi efectuada sobre estes. Neste capítulo estão presentes duas vertentes de análise: a obtenção de um modelo de propagação e a análise do débito relativamente ao tamanho dos pacotes.

No capítulo 6 (“Conclusões”) é apresentado o resumo dos resultados obtidos ao longo da dissertação, assim como propostas de trabalho futuro consideradas mais-valia para o estudo efectuado neste trabalho.

CAPÍTULO 2.

Conceitos

2.1. Ambiente de Propagação

O meio de propagação de uma rede sem fios é o ar. Este meio não tem características lineares, em resultado dos padrões de interferência específicos de cada cenário. É uma tarefa árdua definir modelos matemáticos que permitam descrever o comportamento de um qualquer sistema, nomeadamente modelos de propagação em redes sem fios. Para além do mais, é importante não esquecer que o padrão de cada local é singular; cada localização tem um comportamento específico mediante se é um espaço *indoor* (dentro de casa) ou *outdoor* (fora de casa), se existe a presença de obstáculos, se existe vegetação, etc. Todos estes factores contribuem para a irregularidade da propagação de sinais pelo ar, contribuindo para uma dependência directa da potência recebida e das características do meio.

A potência no receptor não é apenas função da distância do emissor. O artigo [Kot03] explora algumas características inerentes à propagação de sinais não consideradas no desenvolvimento de simuladores de redes sem fios: altura da antena, não-isotropia da área de transmissão, as características do *hardware*, a assimetria nas ligações entre nós e a atenuação do sinal devido à presença de obstáculos.

2.2. Zonas de Recepção

Devido às características irregulares do ambiente de propagação, não é possível afirmar que a taxa de recepção de pacotes (PRR – *Packet Reception Rate*) decresce linearmente ou logaritmicamente com o aumento da distância. É possível delimitar três zonas de recepção, todas elas com características distintas. Existe: a zona conectada (ou zona branca) onde a taxa de sucesso de entrega de pacotes é elevada; a zona de transição (ou zona cinzenta) caracterizada por ser bastante irregular; e a zona desligada (ou zona negra) na qual a taxa de recepção de pacotes é muito baixa.

Tanto a zona conectada como a zona desligada têm um comportamento linear, ou quase linear. É a denominada zona cinzenta que, devido à sua irregularidade, tem sido alvo de vários estudos.

Kannan Srinivasan [Sri06a] caracterizou as zonas cinzentas. A perda de pacotes ocorre quando um receptor a actuar perto do seu limiar de ruído experimenta um decréscimo mínimo na potência recebida, maior que o aumento de ruído no ambiente de propagação. Essas variações causam as zonas cinzentas.

Um estudo detalhado da zona de transição é efectuado em [Zun04]. Através da realização de testes em ambiente real, verifica-se que a zona de transição tem tamanhos diferentes consoante o ambiente de propagação. Em espaço *indoor*, a largura da zona de transição é maior do que em ambiente *outdoor*, embora a zona desligada se identifique a uma distância superior em ambiente *indoor*, o que, provavelmente, é devido às reflexões existentes em ambiente *indoor*. Em [Rei04] tiraram-se conclusões semelhantes. Com dispositivos a transmitir numa frequência de 5MHz, no espaço *indoor* testado (um corredor), a zona cinzenta é muito evidente devido à existência de muitas reflexões, e muito menos evidente em ambientes *outdoor* (campo de ténis e campo de *hockey*) que tem muito menos superfícies reflectoras. O ambiente *indoor* onde foram efectuadas as medições funciona como guia de ondas, levando assim a que a distância máxima de recepção seja superior à dos ambientes *outdoor*.

Kuhn [Kuh05] comprova a existência das zonas cinzentas na transmissão de dados, e cujo tamanho varia com o tipo de ambiente, mas, as suas características mantêm-se. Esta zona é definida como a zona em redor do emissor onde a possibilidade de receber um pacote transmitido diminui com o aumento da distância.

A existência de uma larga zona cinzenta pode ser atribuída à presença de obstáculos. Em [Hal09] foram efectuadas medições em ambientes *indoor* que comprovam esta ligação. Esta é uma zona de particular interesse na implantação de uma rede sem fios porque a variação de ligações não fiáveis limita o desempenho da rede e leva a um maior consumo de energia devido às tentativas de envio da informação.

As fronteiras da zona cinzenta não são constantes. Vários são os factores que modelam o tamanho da zona cinzenta, assim como a distância à qual ocorre a transição entre a zona cinzenta e as zonas envolventes. Em [Zam07], factores como a potência de transmissão e o ambiente de propagação (*indoor* ou *outdoor*) influenciam tanto o tamanho como as fronteiras da zona de transição. Em ambiente *outdoor*, quanto maior for a potência de transmissão, maior é a área cinzenta, mas também maior a zona de boa qualidade de transmissão, existindo uma zona desligada que apenas se evidencia a uma maior distância do emissor. A diferença entre tamanhos e fronteiras das diversas zonas é também evidente na mudança de ambiente de propagação *indoor* e *outdoor*. Em ambiente *indoor*, existe uma maior área cinzenta (Figura. 2.1a). A taxa de recepção de pacotes é razoável até uma distância muito superior à taxa obtida em ambiente *outdoor*. Em ambiente *outdoor*, o tamanho da zona cinzenta é pequeno atingindo-se uma zona desligada a uma distância relativamente curta (Figura. 2.1b).

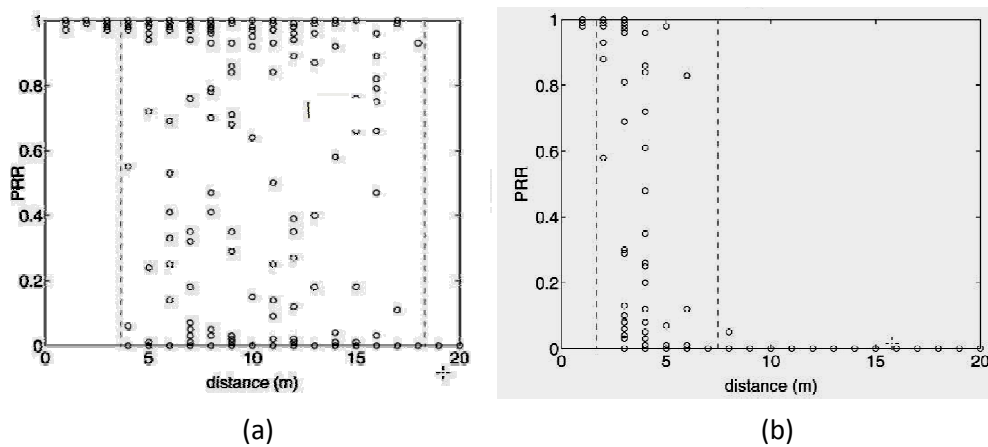


Figura 2.1 - Taxa de recepção de pacotes em função da distância em ambiente (a) *indoor* e (b) *outdoor* [Zam07].

2.3. Métricas para Medição de Qualidade de Sinal

Na implantação de uma rede de sensores, é importante que os protocolos de encaminhamento e de controlo de acesso ao meio atinjam desempenhos óptimos ou quase óptimos para prolongar a vida e melhorar a fiabilidade de uma rede de sensores sem fios. Para que os protocolos referidos possam actuar da melhor forma, é importante conhecer as características das ligações existentes entre os vários nós. Como exemplo, no caso de protocolos de encaminhamento, o melhor caminho é definido com base na qualidade de sinal entre nós. Assim sendo, torna-se crucial para o bom desempenho da rede a possibilidade de medir a qualidade de sinal.

No propósito referido, têm sido desenvolvidas diversas métricas de medição da qualidade de sinal.

As métricas podem ser classificadas por serem baseadas em *hardware* ou em *software*. As baseadas em *hardware* são obtidas directamente do módulo de rádio, não sendo necessário qualquer tipo de computação. Algumas das métricas baseadas em *hardware* são:

- RSSI (*Received Signal Strength Indication*) - é uma das métricas mais utilizadas nos estudos efectuados em redes sem fios, tendo sido introduzida pela norma 802.11 [802.11]. O valor de RSSI é determinado pela potência do sinal recebido, analisando apenas o preâmbulo da trama.
- RCPI (*Received Channel Power Indicator*) – média da potência recebida ao longo de toda a trama no canal seleccionado, ao contrário de RSSI, que apenas analisa o preâmbulo. Métrica introduzida com a revisão 802.11k [802.11k] da norma 802.11.
- LQI (*Link Quality Indication*) ou CCI (*Chip Correlation Indicator*) - métrica introduzida com a norma 802.15.4 [Erg04]. Esta métrica é uma caracterização da potência a cada pacote recebido. Pode ser combinada com a métrica RSSI. O valor da potência recebida é escalado entre o valor inteiro 0 e 255.

Outras métricas utilizadas são, como já referido, métricas baseadas em *software*, com computação matemática. Algumas destas métricas são:

- SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) - é uma medida da potência do sinal relativamente à potência de ruído, ou seja, que compara o nível de sinal desejado com o nível de ruído.
- PRR (*Packet Reception Rate*) - Esta métrica corresponde ao cálculo da taxa de recepção de pacotes.
- WMEWMA (*Window Meaning Exponentialy Wiegthed Moving Average*) [Woo03] - determinado através do cálculo usando como parâmetros o número de pacotes recebidos e o número de pacotes expectáveis de serem recebidos num determinado período de tempo. É determinada pela equação 2.1, onde Pr_t corresponde ao número de pacotes recebidos em t , e PER_t o número de pacotes expectáveis de ser recebidos em t .

$$WMEWMA = \frac{Pr_t}{\max(PER_t, Pr_t)} \quad (2.1)$$

Além das métricas identificadas, muitas outras estão presentes em estudos de redes sem fios, embora as anteriores acabem por ser as mais utilizadas.

A vantagem do uso de métricas *hardware-based* é a possibilidade de determinar a qualidade da ligação por cada pacote, e também uma reacção rápida a mudanças na qualidade da ligação [Liu10].

Vários estudos têm sido efectuados para comparar a fiabilidade de cada uma das métricas. Em [Rei04] é avaliada a métrica RSSI, verificando-se que existe um limiar dependente do ambiente acima do qual a taxa de recepção é boa. Abaixo desse limiar, o valor de RSSI diz muito pouco sobre a taxa de recepção.

O estudo efectuado em [Liu10] verifica que a métrica LQI tem grandes flutuações de valor para um sinal, o que torna difícil a determinação da qualidade de ligação. Foi então proposto um filtro para possibilitar a determinação da qualidade da ligação com base nesta métrica.

Kannan Srinivasan [Sri06a] avalia duas métricas: RSSI e LQI. O RSSI é tido como sendo estável e com pouca variação, e que alterações na rede podem ser rapidamente detectadas. Mas, não fornece muita informação sobre a zona cinzenta. A métrica LQI, apesar de leituras ruidosas, pode fornecer muita informação em zonas instáveis. A métrica RSSI consegue fornecer uma rápida e precisa estimativa de quando uma ligação está na zona cinzenta ou não.

Também em [Gun07] o RSSI é apresentado como uma melhor métrica de qualidade do canal em zonas de recepção com baixa ou alta taxa de recepção e acima do limiar de sensibilidade da antena. O LQI é identificado como melhor preditor em zonas de maior instabilidade.

Kannan Srinivasan [Sri06b] afirma que abaixo de um determinado limiar, o RSSI não permite obter qualquer resultado, sendo LQI uma melhor técnica. Os elementos de rádio usados foram o CC2420, que tem uma sensibilidade de cerca de -90 dBm [CC2420]. O RSSI abaixo de -87 dBm não permite obter conclusões sobre o comportamento do canal. Também a média do LQI indica ser uma métrica melhor da qualidade de canal, embora sejam necessários muitos pacotes para se obter um valor preciso, o que implica que a adaptação a mudanças no canal seja mais lenta.

Outro trabalho relacionando RSSI com LQI [Hol06], deposita maior fiabilidade na métrica RSSI devido a ter uma margem de erro muito inferior à técnica LQI.

2.4. Factores de Irregularidade no Meio de Propagação

Como foi referido atrás, o ar como meio de propagação de sinais electromagnéticos tem uma complexidade extrema, devido à existência de características dificilmente padronizáveis. Essas características, ou irregularidades, que modelam a transmissão de informação de um emissor para um receptor e que definem como um sinal se propaga entre os dois dispositivos, determinam a recepção ou não da informação.

Vários são os factores causadores de irregularidades. A presença de obstáculos provoca alterações na potência do sinal recebido. Em [The05], mostra-se que o crescimento das plantas do cultivo num campo agrícola que ocorreu no período de aproximadamente um mês afectou largamente a potência recebida. Este estudo identificou outro factor que influencia a transmissão

de pacotes: a humidade. Verificou-se também que à noite e em períodos de chuva, houve uma melhoria na qualidade da propagação. Em [Fan03], mostra-se que um espaço aberto tem maior atenuação que um ambiente arborizado, o que prova que nem sempre os espaços abertos têm melhores propriedades em termos de propagação de sinais.

Medidas obtidas em [Rei04] provam que ambientes *indoor* têm maior área de alcance de transmissão devido às paredes que funcionam como guias de ondas. Ainda neste estudo, demonstra-se que o desempenho dos dispositivos não é suficiente para ter impacto na potência recebida. Esse impacto é maioritariamente atribuído ao ambiente de propagação. Além do tipo de local (*indoor* ou *outdoor*), a temperatura é também identificada como tendo impacto na potência recebida. O valor da potência recebida sofreu alterações em testes com um padrão idêntico, mas realizados em dois dias diferentes (em períodos do dia também diferentes), demonstrando assim a complexidade da propagação de sinais em meios como o ar.

Em [Jim09] é mostrado que ambientes fortemente obstruídos têm impactos nas zonas de recepção. Nestas condições, nota-se uma diminuição da zona conectada, o quase desaparecimento da zona transaccional, e um grande aumento da zona desligada.

O constante desenvolvimento do *hardware* dos nós sensores, assim como as suas limitações, têm provocado a criação de diversos protocolos, de controlo de acesso ao meio e de encaminhamento. Esse constante desenvolvimento implica uma constante evolução dos métodos para testar os novos protocolos.

2.4.1. Impactos

A implementação de uma rede de sensores sem fios é um processo moroso e dispendioso, pelo que o recurso a simuladores torna-se uma necessidade. São estas ferramentas que permitem testar exaustivamente o comportamento de novos protocolos, sem os custos elevados que teria implementar uma rede com grande quantidade de dispositivos.

Mas o estudo de novos protocolos, seja de controlo de acesso ao meio, seja de encaminhamento, recorrendo a simuladores, pode conduzir a conclusões erradas sobre o desempenho dos mesmos. Em [Kuh05], são comparados os resultados obtidos recorrendo a simulador com resultados obtidos usando *hardware*, e comprova-se que o estudo de protocolos de encaminhamento pode ser irreal quando efectuado recorrendo a simuladores. Esta diferença está associada aos modelos de propagação, definidos na camada física, e utilizados pelos simuladores, por serem simplistas e não terem em consideração a irregularidade do meio de propagação.

Estudos comprovam que as assimetrias e irregularidades do meio de propagação têm grande impacto nas camadas protocolares superiores, como é o caso da camada de encaminhamento e a camada MAC [Hos10], [Gan02], [Zam07], [Tak01].

A distância é tida, mesmo pelos modelos mais simplistas, como influenciador da potência na recepção. Mas a distância não é um factor de irregularidade, é uma característica presente em todas as redes sem fios, independentemente do tipo de terreno, da presença de obstáculos, dos dispositivos. Dependendo apenas da distância, a potência recebida é sempre inversamente proporcional ao aumento da distância, embora o factor de atenuação varie mediante um conjunto de características da rede, dos dispositivos e do meio de propagação, identificados nas próximas secções.

2.4.2. Altura da Antena

A altura da antena é um factor que determina a área da cobertura de rádio. Xia [Xia93] revela que a potência de recepção, e por consequência a área de cobertura da antena emissora, aumenta com o aumento da distância relativamente ao solo.

Em [Jim09] foram efectuados testes com nós sensores onde se verifica que quanto mais alta se encontra a antena relativamente ao solo, melhor é a recepção. Dispositivos perto do chão presenciam uma menor zona conectada e uma taxa de recepção irregular. Foram identificados dois factores que podiam contribuir para a relação altura da antena/zonas de recepção: o modelo de radiação da antena muda perto do chão e uma antena colocada com maior elevação relativamente ao solo permite comunicação em linha de vista.

2.4.3. Cobertura Rádio

A cobertura rádio das antenas tem sido estudada, sendo considerado também como um factor de irregularidade não contemplado em vários modelos de propagação. Em [Que06] é efectuado um estudo que demonstra que a área de cobertura rádio de uma antena não é regular, não é um círculo perfeito, nem tão pouco se assemelha a um círculo.

2.4.4. Simetria do Canal Rádio

Nem sempre é verdade que apesar de um nó B receber de um nó A, A recebe de B. Esta é a descrição mais simplista do que é a assimetria nos canais rádio entre emissor e receptor.

Este factor foi avaliado em [Rei04] e [Cer05], onde se comprova que as ligações com boa qualidade de recepção são simétricas, o mesmo acontece com ligações de baixa qualidade. É na zona cinzenta que mais se verificam as relações assimétricas nas ligações.

Em [Gan02] o aumento de canais assimétricos está relacionado com o aumento da distância entre o emissor e o receptor, particularmente em canais de baixa potência.

2.4.5. Potência de Transmissão

Um factor determinante na potência recebida é a potência usada na transmissão dos dados. Víctor Jiménez [Jim09] demonstra a dependência da potência de recepção e do alcance máximo com a potência de transmissão. É identificado que o tamanho e fronteiras das zonas de recepção também variam com a potência de emissão.

Também em [Woo03] se demonstra que existe uma zona de transmissão onde os nós têm boa conectividade, e que essa zona aumenta com o aumento da potência.

Mallinson [Mal07] mostra a taxa de recepção de pacotes e o alcance em função da potência de transmissão. Para maiores níveis de potência aumenta o alcance e a zona conectada, onde a taxa de recepção é aproximadamente 100%.

2.4.6. Frequência

A diversidade de dispositivos sem fios e de gamas de frequências utilizadas pelos diversos protocolos torna importante verificar também a qualidade de recepção em função da frequência usada. Em [Soh99] foi efectuado o estudo relativamente a este ponto, onde se comprova que a variação na frequência numa banda entre 800MHz e 1000MHz tem impactos no sinal recebido.

2.4.7. Interferência

A faixa de frequências usada no protocolo 802.15.4, aplicado a redes de sensores sem fios, é também usada por outros protocolos para efectuarem as comunicações. Em [Sad06], [Jim09] e [Sri06a] são estudados os efeitos da interferência provocada por dispositivos a operar na mesma frequência que os nós sensores. As conclusões obtidas revelam que a norma IEEE 802.11 pode ter grande impacto, provocando uma grande diminuição da qualidade de comunicação da rede de sensores. Em [Sad06] é ainda referido que a norma *Bluetooth* não tem um impacto tão elevado na rede de sensores.

Em [Rei04] é verificado que a interferência entre dispositivos tem grande impacto na distância máxima de recepção. Este impacto é mais acentuado quando o nó interferente se

encontra localizado junto do nó receptor. A distância máxima de cobertura aumenta proporcionalmente à distância entre emissor e nó interferente.

2.4.8. Tamanho dos Pacotes

O tamanho dos pacotes também tem influência na qualidade de recepção e na determinação por parte do receptor se um pacote está corrompido e se é necessária uma retransmissão. Em [Mal07] é estudado o impacto que o tamanho dos pacotes transmitidos pode ter. Este estudo revela que quanto maior for o pacote, menor será a taxa de recepção. Na zona conectada só pacotes com tamanho na ordem dos 100 Bytes têm algum impacto na taxa de recepção, enquanto que na zona cinzenta, um tamanho de 30 Bytes pode alterar bastante a taxa de recepção.

2.5. Protocolos MAC

Numa rede de sensores sem fios, o acesso ao meio de propagação tem de ser controlado, de forma a evitar colisões entre pacotes. O protocolo de acesso ao meio, *Medium Access Control* (MAC) é o protocolo encarregue de assegurar um equilibrado e justo acesso ao meio de comunicação pelos diversos dispositivos da rede. Ian Akyildiz [Aky02] define dois objectivos para o protocolo MAC numa rede de sensores sem fios: a criação da infra-estrutura da rede (estabelecimento dos canais de comunicação) e a partilha eficiente e justa dos recursos de comunicação entre os nós sensores.

As restrições em termos de energia dos nós sensores impossibilitam a adopção de protocolos existentes para outros tipos de redes. De forma a tornar os protocolos MAC compatíveis com as restrições de energia dos nós sensores, foram adoptados períodos de escuta e de adormecimento. Ou seja, o dispositivo rádio de um nó fica activo ciclicamente durante um curto período de tempo. Durante o restante tempo está desligado, praticamente não consumindo energia.

Uma causa para o aumento do consumo de energia nos nós sensores são as colisões na transmissão de pacotes. Estas obrigam à retransmissão dos pacotes, o que implica que o rádio esteja ligado mais tempo, e por consequência, um maior consumo de energia.

Dadas as limitações e características referidas, têm sido desenvolvidos vários protocolos de controlo de acesso ao meio para redes de sensores sem fios, baseados em diferentes abordagens. Abaixo são identificadas essas abordagens, assim como alguns protocolos desenvolvidos.

2.5.1. Protocolos TDMA e CSMA

Cada nó tem um período no qual está activo, ou seja, nesse período está apto a transmitir ou receber pacotes. Esses períodos podem ser síncronos, onde dois ou mais nós “acordam” e “adormecem” simultaneamente, ou assíncronos, onde o período de adormecimento é independente dos restantes nós. Por último, existem protocolos híbridos que utilizam o método síncrono e assíncrono.

Um método utilizado nos protocolos MAC é o CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). Este método permite a escuta do canal para verificar a ocorrência de transmissões. É particularmente utilizado para reduzir o número de colisões de pacotes. Esta técnica é muito utilizada nos protocolos assíncronos, visto que o facto de estes não terem *slots* dedicados entre emissor e receptor, leva à necessidade de verificar o estado do canal antes de iniciar uma transmissão.

Os protocolos TDMA (*Time Division Multiple Access*) são baseados na divisão temporal do acesso ao meio pelos vários dispositivos com um acesso síncrono, onde os acessos ao meio são controlados de maneira a não ocorrerem colisões (excepto as que decorrem de interferências entre nós distanciados mais do que um troço).

Nas próximas secções, são abordados os protocolos assíncronos, síncronos e híbridos.

2.5.1.1. Protocolos Assíncronos

O período em que o nó está com o rádio activo é dependente apenas do próprio nó. Os modelos assíncronos não têm qualquer sincronização de períodos activos entre nós. Para a transmissão de informação, o nó receptor tem de ser “acordado” pelo emissor. A maioria dos modelos usa o envio de preâmbulos para o efeito. A seguir são apresentados alguns dos modelos assíncronos desenvolvidos para redes de sensores sem fios.

2.5.1.1.1. B-MAC

O protocolo B-MAC (*Berkeley Media Access Control*) [Pol04] foi desenvolvido com o intuito de minimizar o consumo de energia, de disponibilizar uma interface flexível, de proporcionar um método efectivo de evitar colisões e possibilitar uma alta utilização do canal de comunicação.

Para evitar colisões, o protocolo B-MAC utiliza o mecanismo CCA (*Clear Channel Assessment*) para determinar se estão a ocorrer transmissões no momento de tentativa de envio de informação. Este mecanismo permite obter o nível de potência do sinal através da média de várias amostragens. Quando esse valor está acima de um limiar predefinido, conclui-se que o

canal está ocupado. Neste caso, o nó recorre ao mecanismo de *backoff*, que consiste em esperar um determinado tempo até tentar nova transmissão, altura em que executará novamente o mecanismo CCA.

O mecanismo LPL (*Low Power Listening*) é caracterizado por um *duty-cycle*, ou seja, pela relação entre o tempo no estado activo e o tempo no estado adormecido. Quando um nó fica no estado activo, monitoriza o canal através do mecanismo de CCA. No caso de detectar a ocorrência de transmissões, permanece à escuta o tempo suficiente para a recepção de um pacote. Após a recepção, o nó continua a monitorizar o meio durante um intervalo curto de tempo. Desta forma, neste período não é necessário usar preâmbulos para enviar pacotes para o nó, permitindo obter débitos elevados na comunicação entre dois nós. No caso de não haver recepção de pacotes, expira um temporizador e o nó passa para o estado adormecido.

Relativamente à transmissão de dados, o protocolo B-MAC define o envio de um preâmbulo de forma a “acordar” o receptor. O tempo de duração do preâmbulo deve ser pelo menos a duração do período de adormecimento do receptor de forma a garantir que o nó receptor consegue detectar o preâmbulo e manter-se no estado activo para efectivamente receber os dados.

A destacar ainda o envio de uma mensagem de *Acknowledge* (ACK) para confirmar a correcta recepção de um pacote *unicast* assim que este é recebido. Esta mensagem permite obter uma fiabilidade maior a nível das transmissões.

Este protocolo, ao fornecer uma interface flexível, tem a vantagem de permitir o ajuste de mecanismos como o CCA, o envio dos pacotes ACK, o tempo de *backoff* e o LPL.

Devido ao tamanho do preâmbulo, o receptor tem de esperar todo o período até o preâmbulo terminar, o que obriga o receptor a manter o rádio ligado e por consequência, um elevado consumo de energia. Embora o nó receptor possa ser acordado no início do preâmbulo, tem de aguardar até ao fim do preâmbulo e só depois pode o emissor enviar os dados.

Outro problema deste protocolo é o da escuta (*overhearing*), que acontece quando um receptor, que não é o destinatário do pacote, acorda durante o envio do preâmbulo e mantém esse estado até o início do pacote, altura em que “descobre” que não é o destinatário.

2.5.1.1.2.X-MAC

O protocolo X-MAC [Bue06] foi desenvolvido para tentar eliminar alguns dos problemas detectados no protocolo B-MAC.

O protocolo X-MAC implementa o envio de uma sequência de pequenos preâmbulos a anteceder o envio dos dados. O tamanho reduzido do preâmbulo permite uma melhor eficiência energética relativamente ao protocolo B-MAC.

De forma a eliminar o problema de *overhearing*, este protocolo envia o destinatário dos dados no preâmbulo, permitindo assim que nós que não sejam os destinatários possam passar rapidamente para o estado inactivo. Mesmo para o destinatário foi desenvolvido um método para permitir diminuir o tempo e o consumo energético do nó receptor. Ao receber um preâmbulo, envia um pacote PACK (*Preamble Acknowledgement*) e não é necessário aguardar pelo fim do envio do preâmbulo para ser efectuada a transmissão dos dados.

O ajuste dinâmico do *duty-cycle* dos receptores consoante a carga existente na rede é mais uma das características deste protocolo.

2.5.1.1.3. WiseMAC

O protocolo WiseMAC [Hoi03] é baseado na técnica CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) e efectua regularmente a amostragem do meio para minimizar o consumo de energia. Todos os nós numa rede realizam a amostragem do meio periodicamente, onde esse período é constante.

Uma das vantagens deste protocolo em relação ao protocolo B-MAC consiste na memorização do instante da amostragem do meio nos vizinhos directos. Conhecendo-se o instante em que o vizinho acorda para realizar a amostragem do meio, o nó pode enviar o preâmbulo ligeiramente antes desse momento, possibilitando uma reduzida dimensão do mesmo.

Esta abordagem reduz a energia consumida devido à transmissão e recepção de mensagens, assim como a causada pela existência de *overhearing*. São também usados esquemas de *backoff* e reserva do meio para melhorar o desempenho em termo de *fairness* (justiça no acesso ao meio) e redução de colisões.

2.5.1.2. Protocolos Síncronos

A característica que define os protocolos MAC síncronos é a necessidade de sincronização temporal entre os nós da rede e a atribuição de um (ou mais) *slot* temporal a cada nó, para que o acesso à rede seja justo.

Este tipo de protocolos é mais eficiente face a protocolos assíncronos quando existe uma maior quantidade de tráfego na rede.

2.5.1.2.1.S-MAC

No protocolo S-MAC (*Sensor Medium Access Control*) [Ye04] os nós transitam entre o estado activo e inactivo periodicamente. Quando no estado activo, escutam o canal de forma a verificar se algum outro quer “falar” com ele. Durante o período de adormecimento, o nó desliga o seu rádio e activa um relógio para passar novamente para o estado activo.

Dado este ser um protocolo em que os nós estão sincronizados nos seus tempos de actividade, os *drifts* (desvios) dos relógios podem causar erros de sincronização. De forma a evitar estes erros, os nós da rede divulgam o seu período de actividade através da difusão periódica de pacotes SYNC (*Synchronization*).

De forma a evitar colisões, todos os nós escutam o canal antes de iniciar uma transmissão. Se detectarem o meio ocupado, adormecem e voltam a ficar activos no período definido, escutando novamente o canal para verificar se já pode proceder à transmissão dos dados. Os pacotes enviados em *unicast*, usam a sequência de mensagens RTS(*Request To Send*)/CTS(*Clear To Send*)/DADOS/ACK entre o emissor e o receptor, desenvolvida para lidar com situações de terminal escondido [Bha94]. Os pacotes enviados em difusão (*broadcast*) são enviados isoladamente. Os nós não cumprem os seus períodos de adormecimento enquanto está a decorrer uma transmissão.

Uma outra técnica usada pelo protocolo é a *Adaptive Listening* (escuta adaptativa). Este método consiste em colocar os nós que não são destinatários de uma mensagem, mas que receberam um RTS ou CTS, a acordarem por um curto período de tempo após a transmissão da mensagem. Desta forma, se o nó for o próximo destino de mensagens, o emissor pode de imediato enviar a mensagem, não tendo de esperar pelo próximo período de actividade do receptor.

De forma a evitar *overhearing*, o protocolo S-MAC coloca os nós interferentes no estado adormecido após receberem um pacote RTS ou CTS. Este procedimento evita que nós que não são o destino da informação escutem longos pacotes de dados e o pacote ACK seguinte.

Outro mecanismo é o de *message passing*. O elevado custo da retransmissão de longas mensagens levou o protocolo S-MAC a fragmentar grandes mensagens em vários pacotes pequenos e transmiti-los em rajada, empregando apenas o mecanismo RTS/CTS para reservar o canal para a transmissão de todos os fragmentos. Sempre que um fragmento é transmitido, o emissor espera por um ACK do receptor. Se não receber o ACK, o tempo reservado para a transmissão será estendido o tempo suficiente para o envio de mais um fragmento, e retransmite o fragmento de imediato.

2.5.1.2.2. T-MAC

O protocolo T-MAC (*Timeout Medium Access Control*) [Dam03] surgiu com o objectivo de melhorar o protocolo S-MAC.

Uma das características deste protocolo é a adaptabilidade do *duty-cycle* consoante a carga existente na rede. Quando não é detectado nenhum evento num curto período de tempo, o nó volta ao estado inactivo, diminuindo assim o tempo que os nós estão no estado activo quando não existem dados para transferir e diminuindo também o consumo energético quando o tráfego na rede é baixo.

2.5.1.2.3. SCP-MAC

O protocolo SCP-MAC (*Scheduled Channel Polling Medium Access Control*) [Ye06] tem como principal característica a união entre sincronismo e LPL (*Low Power Listening*).

De forma a conjugar o melhor dos protocolos síncronos e assíncronos, o protocolo SCP-MAC coloca os nós no estado inactivo quando não há tráfego, sendo efectuada a escuta do meio periodicamente. Essa escuta é efectuada simultaneamente por todos os nós. A vantagem desta sincronização prende-se com o facto de um pequeno sinal ser suficiente para acordar um nó.

Para o envio de dados, o emissor procede à escuta do canal antes do envio do sinal de *wake up*, que é realizado na altura em que o receptor escuta o canal. Se não detectar actividade, é então enviado o sinal que activa o receptor. Após o envio do sinal de *wake up*, é efectuada nova escuta do canal, e só se for novamente detectado que não existem transmissões a decorrer, é que é enviada a informação para o receptor. Este protocolo tem como principal desvantagem a elevada precisão de sincronização entre os nós que é requerida, devido aos períodos de escuta do canal serem muito reduzidos.

2.5.1.2.4. MS-MAC

O protocolo MS-MAC (*Medium Access Protocol for Sensor Networks*) [Pha04] foi desenvolvido tendo como base o protocolo S-MAC. O funcionamento para nós estáticos é idêntico ao protocolo S-MAC, sendo introduzidas alterações de forma a suportar a mobilidade dos nós.

Para a sincronização de um novo nó introduzido na rede, o protocolo S-MAC pode introduzir um grande atraso. Um nó pode ter de esperar até 2 minutos para estabelecer a ligação e se sincronizar com um nó vizinho.

De forma a tentar eliminar o problema, o protocolo MS-MAC introduz um novo mecanismo. A presença de mobilidade é detectada pela potência dos pacotes SYNC recebidos. Se forem detectadas alterações de potência, então é assumido que um nó vizinho ou o próprio está em movimento. Através da variação da potência é possível determinar a velocidade dos nós. Essa informação é determinante para a estimação de zonas activas, e ao ser propagada entre *clusters* vizinhos (através do pacote SYNC), permite que o nó móvel possa estabelecer ligação com um novo *cluster* antes de perder ligação com o antigo.

2.5.1.3. Protocolos Híbridos

Os protocolos híbridos, pelo facto de poderem operar em modo síncrono ou assíncrono, permitem uma melhor adaptação à carga da rede. Os protocolos assíncronos, ao não necessitarem de sincronismo, têm um consumo energético mais eficiente e quando o tráfego na rede é baixo, têm um desempenho óptimo.

Para redes com maior tráfego, os protocolos assíncronos já não garantem um acesso ao meio justo e livre de colisões, pelo que o sincronismo consegue colmatar essa lacuna.

2.5.1.3.1. Z-MAC

O protocolo Z-MAC (*Zebra MAC*) [Rhe08] combina os métodos TDMA e CSMA com o objectivo de explorar as vantagens e de eliminar as desvantagens destes dois métodos. Em situações de carga elevada utiliza o esquema TDMA, e em baixa carga, comporta-se como CSMA.

A descoberta de vizinho é efectuada difundindo pela rede uma mensagem PING, que inclui a lista de vizinhos a 1 troço. Assim, cada nó recolhe a informação de nós à distância de 2 troços.

A alocação de *slots* é efectuada recorrendo ao protocolo DRAND [Rhee05]. Este protocolo assegura uma distribuição aleatória dos *slots* onde nenhum nó a uma distância inferior ou igual a 2 troços tem atribuído o mesmo *slot* para a transmissão de dados. Esta forma de alocação de *slots* garante a ausência de interferência entre os nós da vizinhança situados a 1 ou 2 troços.

2.5.1.3.2. MH-MAC

O protocolo MH-MAC (*Multimode Hybrid MAC*) [Ber07] foi desenvolvido de forma a permitir operar em três modos de funcionamento. Um nó pode estar no modo síncrono, assíncrono e *full-on* (no qual os nós não "adormecem"). Por omissão, um nó encontra-se no estado assíncrono, mas a aplicação pode alterar o estado para síncrono ou *full on*.

No estado em que o nó permanece sempre activo (*full on*), é utilizado o mecanismo RTS/CTS antes do envio de dados, e a recepção dos pacotes é confirmada por parte do receptor. Os nós quando se encontram neste estado têm um elevado consumo energético.

O modo assíncrono usa um mecanismo de LPL semelhante ao usado no protocolo X-MAC. O envio de dados é precedido do envio de uma sequência de pequenos preâmbulos com duração de pelo menos duas vezes a duração do período de *duty-cycle*, de forma a garantir que o receptor está acordado quando o pacote de dados é enviado. O preâmbulo inclui o endereço do nó destinatário dos dados. Assim que recebe um preâmbulo o nó receptor pára o envio de preâmbulos *unicast* através de pacotes PACK (*Preamble Acknowledgement*), encurtando assim a duração do envio dos dados.

Com tráfego *broadcast*, o período de envio de preâmbulos não pode ser encurtado, de forma a assegurar que todos os nós estão activos na altura do envio dos dados. Mas um nó que recebe um preâmbulo pode transitar para o estado adormecido durante um intervalo até ao fim do envio do pacote de dados (indicado no preâmbulo). De forma a lidar com colisões de preâmbulos, um receptor pode enviar um pacote SHUT UP, fazendo assim que os emissores mais recentes parem o envio de preâmbulos. Após a recepção dos pacotes de dados, o receptor fica activo por um curto período a aguardar a recepção de novos pacotes. Se tal não acontecer, volta para o estado adormecido.

No modo síncrono, o protocolo MH-MAC define um *duty-cycle* composto por 11 *slots* de tempo, cada um com 100ms. Destes 11 *slots*, 1 é utilizado por todos para troca de informação de controlo e de criação/manutenção de sincronismo, assim como para troca de dados *broadcast* e *unicast*. Os restantes 10 *slots* são dedicados para transmissões *unicast*, onde apenas dois nós permanecem activos.

No *slot* público, é usado um mecanismo de contenção. Os nós verificam o estado do canal antes de enviarem pacotes de dados. É também neste *slot* que são enviados periodicamente pacotes SYNC de forma a ser possível manter o sincronismo entre os nós.

Os *slots* dedicados estão reservados para comunicações *unicast*. A troca de informação é confirmada pelo receptor, mas não é utilizado o mecanismo RTS/CTS, já que a alocação dos *slots* garante com uma elevada probabilidade a não ocorrência de colisões.

O processo de sincronismo entre dois (ou mais) nós assíncronos tem uma duração máxima de dois períodos de *duty-cycle*, ou seja, 2.2s. O protocolo de sincronização está ilustrado na figura 2.2. É enviada uma sequência de preâmbulos de forma a acordar todos os nós vizinhos. Terminado o envio dos preâmbulos, é enviado um pacote HELLO, o qual pode ser enviado em *unicast* ou *broadcast*, dependendo se é pretendido sincronizar com todos os nós na vizinhança ou apenas com um nó. Após a recepção do pacote HELLO, é efectuada uma troca de pacotes *Request/Ok* para descoberta de vizinhança e alocação de *slots* dedicados.

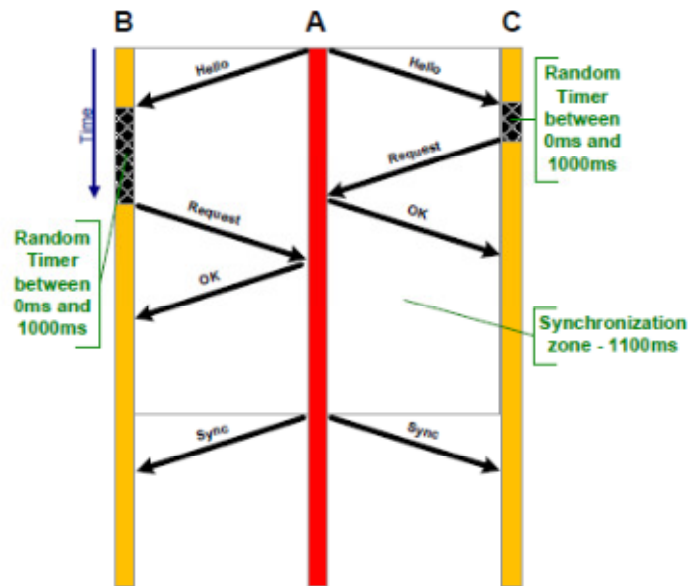


Figura 2.2 - Processo de sincronização entre nós assíncronos [Ber10].

2.5.1.3.3. MMH-MAC

O protocolo MMH-MAC (*Mobile Multimode Hybrid MAC*) [Ber10] foi desenvolvido tendo por base o protocolo MH-MAC, mas otimizado para redes de sensores sem fios móveis. Essa otimização passa pela existência de mecanismos que garantem uma rápida agregação de nós móveis a nós ou *clusters* (grupos de nós) estáticos.

O protocolo MMH-MAC define dois métodos para descobrir e sincronizar nós assíncronos com grupos de nós (*clusters*) vizinhos síncronos: método passivo e método activo. O modo passivo caracteriza-se pelo facto de um nó assíncrono aguardar passivamente pela recepção de um pacote SYNC, de forma a ficar sincronizado com o *cluster* síncrono. O método activo caracteriza-se pelos nós em modo assíncrono usarem continuamente o protocolo de sincronização MH-MAC referido anteriormente para detectarem *clusters* síncronos. Este método baseia-se no envio de pacotes SHUT UP por parte dos nós síncronos. Este pacote interrompe o envio de preâmbulos, e antecipa o envio de um pacote SYNC, encurtando significativamente o tempo de sincronização face ao MH-MAC. Este fluxo está ilustrado na figura 2.3.

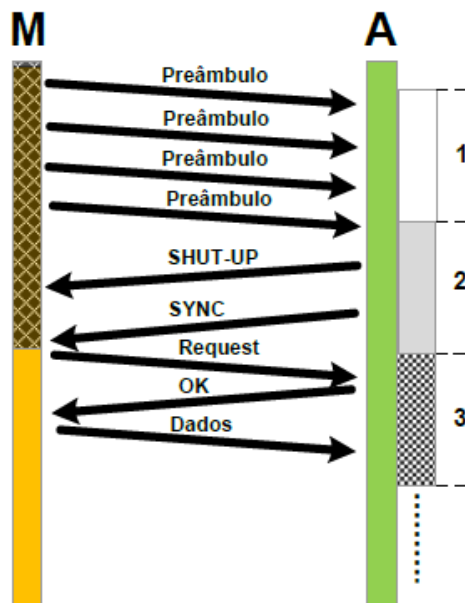


Figura 2.3 - Processo de sincronização quando o nó fixo se encontra síncrono [Ber10].

2.5.2. Protocolos Multi-Canal (FDMA)

Os protocolos multi-canal fazem uso dos vários canais disponíveis na gama de frequências disponibilizadas para redes de sensores sem fios [Erg04]. Assim sendo, uma forma de evitar colisões é a de transmitir usando diversos canais. Esta técnica é denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Os protocolos multi-canal, além de utilizarem uma variação na frequência, também fazem uso da técnica TDMA.

2.5.2.1. TFMAC

O protocolo TFMAC [Jov06] combina as técnicas TDMA e FDMA. Tal como em outros protocolos MAC (S-MAC, T-MAC) é necessária sincronização temporal entre os nós. Cada trama é composta por um *slot* de controlo usado para troca de mensagens de controlo e um *slot* para troca de dados entre os nós. Cada *slot* para troca de informação é dividido em N *sub-slots* de tempo de igual duração, para que em cada *slot* de tempo seja possível a transmissão de um ou mais pacotes.

A cada nó são atribuídos tantos *slots* de tempo quanto o número de canais disponíveis na rede, e cada *slot* de tempo atribuído tem um canal com uma frequência diferente. No lado do receptor, é atribuída apenas uma frequência para recepção de dados durante o seu *slot* de recepção. Todos os nós têm um *slot* de recepção para cada vizinho.

2.5.2.2.HYMAC

O protocolo HYMAC [Sal07] também utiliza as técnicas TDMA e FDMA. O período de comunicação é uma trama TDMA de tamanho fixo. Essa trama, por sua vez, é dividida em vários *slots*. É atribuído a cada nó um *slot* e uma frequência para comunicação. Essa atribuição é efectuada por uma estação base usando o algoritmo BFS (*Breadth First Search*). O algoritmo cria uma árvore tendo como raiz a estação base. Inicialmente, é atribuído um *slot* e uma frequência por omissão a cada nó. De seguida, o algoritmo verifica se existem nós que possam entrar em conflito aquando da comunicação, e ajusta os *slots* de tempo ou as frequências para que sejam evitadas colisões na transmissão de pacotes.

2.5.2.3.Y-MAC

O protocolo Y-MAC [Kim08] é um protocolo TDMA para multi-canal. Os nós estão sincronizados e os *slots* de tempo são atribuídos a cada nó. O protocolo não atribui canais fixos aos nós, embora inicialmente a troca de pacotes seja efectuada no canal base. No caso de existir a necessidade de envio de múltiplos pacotes entre nós vizinhos, os pacotes são enviados em frequências diferentes, seguindo uma sequência predefinida.

2.6. Componentes de Hardware e Software

As redes de sensores sem fios são constituídas por duas componentes, *hardware* e *software*.

O *hardware* representa a parte física da rede, os nós sensores. Estes nós são constituídos por diversos componentes: sensores (luminosidade, temperatura, humidade, pressão, movimento), fonte de energia, unidade processamento, unidade de memória e um dispositivo rádio para permitir a comunicação entre os vários nós.

Alguns exemplos de dispositivos utilizados são: TelosB [TelosB], Mica2 [Mica2], Micaz [Micaz], SmartDust [War03], SunSpot [Sun07].

Os recursos limitados do *hardware* dos nós sensores têm levado ao desenvolvimento de novos sistemas operativos. Alguns exemplos de maior relevância são: TinyOs-2.x [Lev05a] [Lev05b] [Lev07a], Contiki [Dun04] e MantiOS [Bha05].

2.7. Simuladores

As redes de sensores sem fios são redes constituídas por muitos nós sensores, distribuídos espacialmente. A implantação física de uma rede com estas características torna-se bastante dispendiosa.

De forma a permitir o estudo destas redes, têm vindo a ser desenvolvidos simuladores de redes de sensores sem fios. Estas ferramentas devem permitir a criação de um ambiente de teste o mais idêntico possível a uma rede real.

Um modelo de simulação de uma rede de sensores sem fios é composto por diversos sub-modelos, cada um com uma função específica. A interacção entre estes modelos permite a criação de um ambiente de testes. Em [Lop06] e [Lop05], um simulador é constituído por dois modelos: modelo de rede e modelo do nó sensor.

O modelo de rede pretende simular todos os aspectos relacionados com a rede:

- o nó sensor, que do ponto de vista da rede, é um elemento físico que monitoriza um determinado ambiente, processa a informação recolhida e comunica com os restantes nós da rede.
- A componente ambiente, que gera e propaga eventos monitorizados pelos nós, eventos esses que poderão esboletar alguma acção no nó sensor. Os nós recebem a informação monitorizada através de um canal físico. É esse canal que decide quando e quais os nós que recebem os eventos gerados pelo gerador de eventos físicos.
- A componente rádio que define os modelos utilizados na comunicação entre os nós sensores.

A componente rádio é constituída por três módulos:

- Transmissão: módulo que define a potência de emissão, a frequência, a taxa de transmissão de dados
- Propagação: este módulo determina a potência recebida em função dos parâmetros de transmissão e da distância. Podem ser usados vários modelos de propagação (espaço aberto, *two-ray ground reflection*, *shadowing*, *indoor*, *outdoor*, etc.)
- Recepção: este módulo determina com base na potência recebida os pacotes que foram recebidos, se houve erros ou se o canal de transmissão estava ocupado.

Embora o modelo da rede contemple uma componente do nó sensor, existe a necessidade da existência de um modelo para o nó, que define as características do próprio nó, abstraindo-se de toda a sua vizinhança. O modelo do nó inclui:

- A componente protocolar que abrange todos os protocolos de comunicação. Esta componente contém, tipicamente, três camadas: acesso ao meio, encaminhamento e aplicacional. Habitualmente, o comportamento desta componente depende da componente física.
- A componente física pretende simular o *hardware* dos nós. Tem como elementos constituintes os sensores físicos (que simulam o comportamento do hardware de monitorização) e o módulo de energia (que simula o consumo energético do hardware).
- Por último, uma componente de ligação ao “mundo real”, efectuada através de um canal de radiofrequência e de um canal físico (através do qual recebe os eventos ambientais do modelo de rede).

Alguns dos simuladores mais utilizados nas redes de sensores sem fios são o *Tossim* [Lev03a] [Lev03b], *OMNet++* [Var01] [Omnet], *NS-2* [Baj99], etc.

2.8. Aplicações

As redes de sensores sem fios podem ser aplicadas para os mais diversos propósitos:

Militar: para detecção de ataques químicos, biológicos e nucleares, localização de soldados, vigilância de campos de batalha, reconhecimento de inimigos, controlo de equipamentos e munição;

Domótica: controlo da temperatura, detectores de intrusão, detectores de fumo, iluminação, sistemas de portas automáticas;

Ambiental: detecção de incêndios florestais, inundações, detecção de movimentos de animais, agricultura de precisão, estudo da poluição;

Saúde: tele-monitorização de dados fisiológicos humanos, controlo da medicação em unidades hospitalares, localização de médicos e pacientes em hospitais;

Electrónica: controlo remoto universal, brinquedos, turismo;

Comerciais: gestão de stock, monitorização da qualidade do produto, diagnóstico de máquinas, automação e controlo de processos fabris, detecção de veículos, detecção e monitorização de roubos de automóveis;

Alguns projectos de maior relevância existentes usando redes de sensores sem fios são:

- *Great Duck Island* [Mai02]: este projecto consistiu na implantação de nós sensores na ilha Great Duck Island para a observação de aves.
- *ZebraNet* [Jua02]: observação do comportamento de animais selvagens.
- *Volcano* [Wer06]: estudo da actividade vulcânica.

CAPÍTULO 3.

Propagação

Ao processo de transmissão de informação de um emissor para um receptor através de ondas electromagnéticas denomina-se propagação. Os sinais podem ser propagados por diversos meios: cabo coaxial, fibra óptica e pelo ar. Para que seja possível a transmissão de informação através do ar, ou seja, *wireless*, os dispositivos deverão estar dotados de antenas, as quais convertem os sinais de radiofrequência em ondas electromagnéticas.

Dada a irregularidade dos ambientes *wireless* onde poderão ocorrer propagação de ondas electromagnéticas, particularmente em redes de sensores sem fios, torna-se muito complicado prever as características de um sinal recebido apenas com base no sinal emitido. A rede pode estar disposta em ambientes urbanos onde existem edifícios, automóveis e pessoas em movimento; ambientes rurais, onde existe a presença de árvores, animais; terrenos irregulares como vulcões, montanhas; emissor sem linha de vista com o receptor. Em todos estes meios, as características de propagação são diferentes.

Os vários obstáculos presentes no caminho de propagação podem contribuir para atenuação do sinal transmitido, provocando perda parcial e até mesmo total dos dados transmitidos.

3.1. Mecanismos de Propagação

A presença de obstáculos, a mobilidade dos dispositivos e as condições atmosféricas são factores que influenciam a propagação de sinais, devendo ser contemplados nos desenvolvimentos de modelos que estimem a potência do sinal transmitido aquando da recepção. Estão assim definidos os três mecanismos básicos que podem provocar atenuação do sinal [Rap02]:

- **Reflexão** – Este fenómeno ocorre na presença de obstáculos que podem reflectir as ondas emitidas. Depende da dimensão do obstáculo e do comprimento de onda. A reflexão das ondas pode interferir construtivamente ou destrutivamente na onda transmitida.

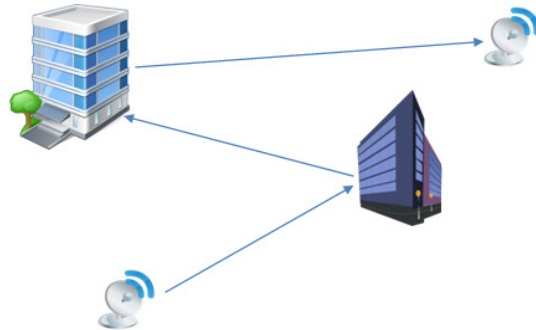


Figura 3.1 - Imagem representativa do fenómeno de reflexão.

- **Difracção** – Ocorre quando existe a presença de obstáculos impenetráveis, e as ondas contornam o obstáculo. Este mecanismo permite enviar sinais entre dispositivos sem linha de vista. Este fenómeno é também denominado de “*shadowing*” devido ao facto de um sinal transmitido poder atingir um receptor mesmo que esteja “na sombra” do obstáculo.

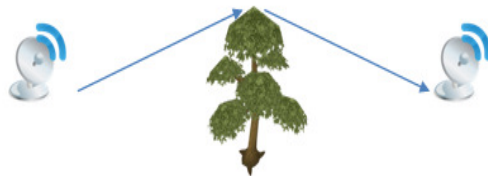


Figura 3.2- Imagem representativa do fenómeno de difracção.

- **Dispersão** – Um terreno rugoso pode originar a dispersão do sinal, ou seja, quando este atinge o solo, será irradiado em várias direcções. A dispersão ocorre com a presença no caminho de transmissão de objectos com uma dimensão na ordem ou menor que

o comprimento de onda do sinal. Em [And95], postes de iluminação e sinais de trânsito dispersam energia em várias direcções, o que permite a recepção de sinais onde este não chegaria através de mecanismos de reflexão ou difracção.

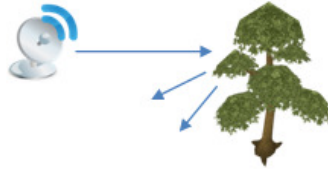


Figura 3.3 - Imagem representativa do fenómeno de dispersão.

3.2. Causas de Atenuação de Sinal

Um sinal electromagnético propaga-se entre o emissor e o receptor através de um ambiente real, composto por uma vasta variedade de objectos e características que têm influência na potência recebida. Estão assim presentes diversos factores que atenuam ou alteram o sinal emitido quando este atinge o receptor:

- **Distância:** a característica mais relevante que modela o sinal recebido é a distância. Num cenário ideal, a potência recebida seria apenas função da distância, o que permitiria determinar sempre com valores exactos a potência recebida a uma certa distância.
- **Propagação multi-caminho:** o sinal reflectido chega ao destino por diferentes direcções, podendo causar efeito construtivo ou destrutivo provocando atenuação e atraso do sinal. Este factor provoca variações abruptas na potência do sinal recebido.

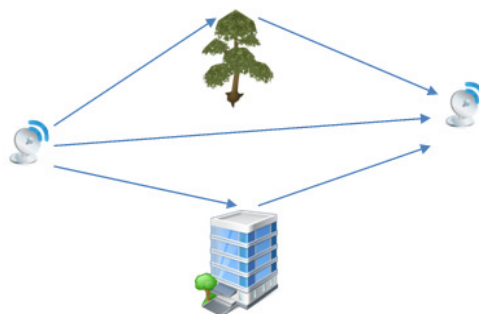


Figura 3.4 - Imagem representativa da propagação multi-caminho.

- **Condições atmosféricas:** a chuva pode ser uma condicionante nas comunicações sem fios para frequências mais elevadas (acima dos 10GHz).

- **Obstrução do caminho:** a presença de objectos no caminho entre o emissor e o receptor e consequente perda de linha de vista (LOS – *Line of Sight*) leva a que para que o sinal possa ser recebido, tenham de ocorrer mecanismos de reflexão e difracção.
- **Tipo de ambiente:** apesar de a diversidade de tipos de ambiente ser vasta, são sempre ambientes *indoor* ou *outdoor*. Em ambientes *indoor*, a presença de obstáculos é superior, causando maiores reflexões ao longo do caminho entre o emissor e o receptor.
- **Tipo de materiais:** a permeabilidade de ondas electromagnéticas é diferente entre os vários tipos de materiais. Materiais mais reflectivos ou mais permeáveis impõem comportamentos diferentes na propagação de sinais electromagnéticos.
- **Terreno:** a irregularidade do terreno, causadora do mecanismo de dispersão, também pode interferir na potência recebida.

3.3. Perdas de Propagação

A potência do sinal recebida pode oscilar mesmo que a potência emitida se mantenha constante. Estas perdas fazem com que, tanto o valor médio do sinal recebido (efeitos grande escala) como o valor instantâneo (efeitos pequena escala ou *fading*) variem. Essas oscilações estão relacionadas com os factores causadores de perturbação do sinal emitido, podendo esses factores provocarem um desvanecimento de maior ou menor duração, e de maior ou menor amplitude. Como o desempenho de qualquer canal sem fios em ambiente real está intimamente relacionado com estas oscilações, torna-se importante o conhecimento das suas características, assim como, determinar e prever os seus efeitos nos diversos ambientes de propagação.

A figura 3.5 representa os dois tipos de perdas: grande escala e pequena escala.

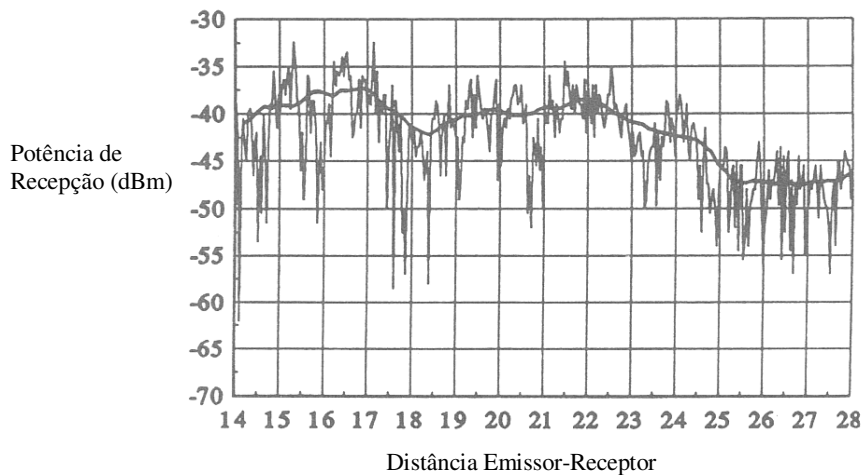


Figura 3.5 - Desvanecimento lento e desvanecimento rápido [Rap02].

Nas próximas secções será detalhado os dois tipos de perdas, assim como as suas causas e modelos matemáticos para calcular o seu impacto.

3.3.1. Path Loss

O *path loss* define a diminuição da potência média do sinal por parte do receptor em função da distância. Um dos modelos de referência usados, *free-space*, assume um modelo ideal de propagação sem interferência, mas existem outros (e.g. modelo de dois raios) que consideram diferentes padrões de interferência. Esta componente é modelada de forma determinística, considerando tanto a distância, como o comprimento de onda, a altura e ganho das antenas.

3.3.2. Grande Escala (Desvanecimento Lento)

As perdas de propagação em grande escala estão relacionadas com as variações na intensidade média dos sinais recebidos. Caracteriza a potência do sinal para grandes distâncias, relativamente ao tipo de antenas utilizadas. Quando ocorrem mecanismos que provoquem este tipo de perdas, o sinal é afectado durante um certo período de tempo. Esses mecanismos são detalhados nas próximas secções.

3.3.2.1. Shadowing

O *shadowing*, ou efeito sombra, deve-se à presença de obstáculos impermeáveis à penetração de ondas electromagnéticas no caminho em linha de vista entre o emissor e o receptor.

Esta componente do sinal pode ser construtiva (melhoria da qualidade do sinal recebido) ou destrutiva (degradação da qualidade do sinal recebido).

As variações devido ao efeito de *shadowing* ocorrem para distâncias proporcionais ao tamanho do objecto no caminho de vista.

Esta componente é frequentemente modelada usando uma distribuição estatística log-normal.

3.3.3. Pequena Escala (Desvanecimento Rápido ou *Fast Fading*)

As perdas de propagação em pequena escala, geralmente designadas por desvanecimento rápido (*fading*), são caracterizadas por rápidas flutuações de amplitude do sinal transmitido, ocorridas em períodos de tempo curtos e a pequenas distâncias. Este fenómeno é provocado pela chegada ao receptor de um mesmo sinal em diferentes instantes, resultando em grandes e rápidas variações de amplitude e fase. As principais causas para o desvanecimento são as transmissões multi-percurso, a presença de objectos que espalham os sinais no ambiente de recepção, flutuações aleatórias nas propriedades do meio de transmissão e o movimento relativo do receptor.

O desvanecimento derivado da propagação multi-percurso pode ter efeito destrutivo ou construtivo, dependendo de como os diversos sinais atingem o receptor.

Dado o seu comportamento aleatório, esta componente pode ser representada com uma distribuição estatística de *Rice* ou *Rayleigh*, abordadas em secções futuras.

3.4. Modelos de Propagação

Um modelo de propagação de sinais de radiofrequência é uma representação matemática da propagação das ondas electromagnéticas. Estes modelos têm como objectivo a possibilidade de prever, sob determinadas características, a potência de sinal quando este atinge o receptor. Estes modelos prevêm a atenuação do sinal em função da frequência, distância entre emissor e receptor, da distância das antenas ao solo, entre outros factores. Os modelos mais precisos têm em conta como possíveis factores de atenuação as características

do ambiente de propagação, assim como a presença de obstáculos no caminho percorrido pelas ondas electromagnéticas que se propagam entre dois dispositivos sem fios.

Os modelos podem ser definidos como:

- **Empíricos** – baseados em medidas, são modelos em que existe uma relação simples entre a atenuação e a distância. Estes modelos contemplam geralmente todos os factores que afectam a propagação, embora possam estar limitados à frequência e ao ambiente de propagação onde foram obtidas as medidas.
- **Teóricos** – criados com base em fundamentos teóricos sobre electromagnetismo. São modelos mais fiáveis, e têm a vantagem de poderem ser aplicados aos mais variáveis tipos de ambientes. São mais difíceis de implementar e exigem muitos mais recursos que os modelos empíricos.
- **Híbridos** – Contemplam os dois modelos anteriores, de forma a tentar colmatar as debilidades de ambos.

3.4.1. Grande Escala

Os modelos de grande escala estimam a atenuação do sinal, vulgarmente designada de *path loss* que mede a diferença entre a potência emitida e a potência recebida. O *path loss* inclui todos os efeitos associados à distância, a altura das antenas dos dispositivos e à interacção de uma onda propagada com os objectos presentes no percurso entre o emissor e o receptor.

3.4.1.1. Modelo *Free Space*

Na literatura, existem muitos modelos de propagação definidos. O modelo mais básico, mas a partir de onde outros derivam, é o modelo de Espaço Livre [Rap02]. Este modelo extremamente simplista considera um caminho completamente desobstruído e com linha de vista entre o receptor e o emissor; é o cenário ideal, mas também irreal no caso de redes sem fios terrestres, e mais irreal quando se está a falar em redes de sensores sem fios. Este modelo determina a potência no receptor apenas em função da potência de emissão, o ganho das antenas e a distância entre emissor e receptor. Não são contempladas no modelo as perdas que podem ocorrer devido ao ambiente de propagação. Fica também por considerar o facto de a área de cobertura de uma antena ser irregular. A comunicação satélite, dado existir linha de vista entre emissor e receptor, pode utilizar este modelo de propagação. A atenuação (*path loss*) para o modelo *Free Space* é definida pela fórmula seguinte:

$$PL(dB) = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (3.1)$$

Na fórmula anterior, G_t e G_r representam, respectivamente, o ganho da antena do emissor e do receptor, λ representa o comprimento de onda, e d é a separação entre o emissor e o receptor.

3.4.1.2. Modelo *Two-Ray* (Dois Raios)

O modelo de Dois Raios (*Two-Ray*) [Rap02] considera um dos mecanismos presentes na radiação de ondas electromagnéticas: a reflexão.

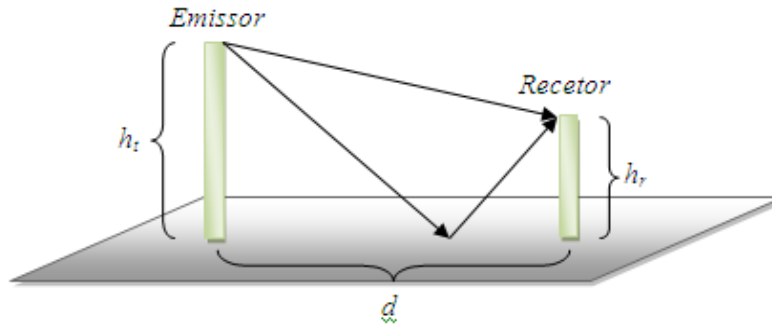


Figura 3.6 - Exemplo de propagação *Two-Ray*.

O modelo de dois raios modela a interferência entre um raio directo emitido directamente do emissor para o receptor e um raio reflectido no solo, ambos representados na figura acima. A potência recebida é a soma das contribuições destes dois raios.

A fórmula seguinte determina o *path loss* para este modelo:

$$PL(d) = 40 \log d - (\log G_t + \log G_r + \log h_t + \log h_r) \quad [dB] \quad (3.2)$$

Este modelo, tal como visto na equação apresentada, determina o *path loss* em função do ganho da antena emissora (G_t) e receptora (G_r), da distância d , da altura da antena emissora h_t e da antena receptora h_r .

Este modelo, além de considerar a existência de linha de vista entre o emissor e o receptor, está indicado para redes cujas antenas estejam localizadas 50 m acima do solo.

3.4.1.3. Modelo *Log-Distance Path Loss* (Log-Distância)

O modelo Log-Distância [Rap02] considera que a potência média recebida decresce logaritmicamente em relação à distância do emissor. Este modelo é caracterizado pela seguinte equação:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.3)$$

onde n representa o *path loss exponent* que indica a taxa a que a potência diminui com a distância (é o coeficiente de decaimento do meio), d_0 é a distância de referência, e d a separação entre o emissor e o receptor. O valor de n pode oscilar entre diversos valores, sendo que alguma literatura defende que será 2 para caso de propagação em linha de vista e sem a presença de obstáculos (*Free Space Model*).

Este modelo não depende da frequência nem dos ganhos das antenas emissoras e receptoras.

3.4.1.4. Modelo *Log-Normal Shadowing*

O ambiente onde é efectuada a propagação das ondas electromagnéticas altera as características do sinal emitido, sendo que no receptor, a potência recebida não depende apenas da distância entre o emissor e o receptor, mas também do meio de propagação. Este é um modelo que contempla a aleatoriedade da propagação mediante o meio onde é propagada a onda.

Os modelos anteriores determinam as perdas de propagação considerando que o raio de comunicação é um círculo perfeito. Na realidade, e como já referido, a potência recebida a uma certa distância é uma variável aleatória devido aos efeitos de propagação.

Neste caso, o *path loss* é determinado da seguinte forma [Rap02]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.4)$$

onde X_σ é uma variável aleatória de distribuição Gaussiana em dB com média nula e desvio padrão σ . Os valores σ e n são determinados com base em medições efectuadas.

Este modelo é semelhante ao modelo *Log-Distance Path Loss* com a adição da componente de *Shadowing*, X_σ .

3.4.1.5. Modelo RIM

Um modelo desenvolvido propositadamente para redes de sensores sem fios foi o modelo RIM (*Radio Irregularity Model*) [Zho06].

Em modelos isotrópicos de cobertura rádio, a potência recebida é obtida através da seguinte equação:

$$Pr = Pe - PL + F \quad (3.5)$$

Como já foi referido, a cobertura rádio não é um círculo perfeito em ambientes reais, nem tão pouco se assemelha a um círculo. O modelo RIM assenta nesta irregularidade.

Para simbolizar a irregularidade do modelo de cobertura rádio, o parâmetro DOI (*Degree of Irregularity*) foi introduzido no modelo RIM. Abaixo, são apresentadas imagens que representam a variável DOI para diversos padrões de cobertura rádio.

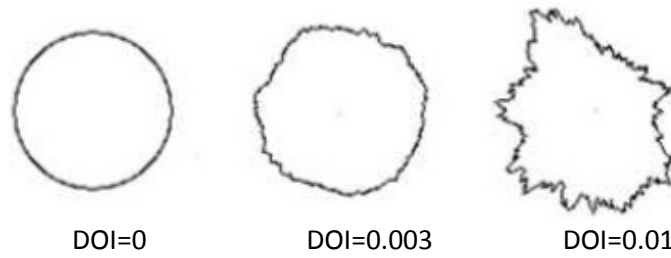


Figura 3.7 - Grau de Irregularidade (DOI) [Zho06].

É possível observar pela figura anterior que quanto maior a irregularidade da cobertura rádio, maior será o valor do parâmetro DOI.

Os modelos de *path loss* são ajustados com os valores do parâmetro DOI, resultando na seguinte fórmula:

$$PR = PE - PL_{DOI} + F \quad (3.6)$$

onde PR representa a potência recebida, PE a potência de emissão, PL_{DOI} o *path loss* com ajuste DOI (determinado pela equação 3.6) e F a componente de *fading*.

$$PL_{DOI} = PL \times K_i \quad (3.7)$$

onde PL representa o path loss e a variável K_i o coeficiente que representa a diferença nas perdas *path loss* em diferentes direcções, o coeficiente do i -ésimo grau. Esta variável é determinada da seguinte forma:

$$K_i = 1 \quad (i = 0) \quad (3.8)$$

$$K_i = K_{i-1} \pm Rand \times DOI (0 < i < 360 \wedge i \in N) \quad (3.9)$$

onde

$$|K_0 - K_{359}| \leq DOI \quad (3.10)$$

É visível pela equação anterior que é possível determinar a potência recebida em 360 direcções, começando do ponto $i = 0$ e circulando grau a grau até uma volta completa.

3.4.2. Pequena Escala

A componente aleatória do sinal que representa o desvanecimento rápido do sinal é representada, como já referido, recorrendo à distribuição de *Rayleigh* e *Rice*, abordadas nas próximas secções.

3.4.2.1. Distribuição de *Rayleigh*

Um sinal é recebido na antena receptora por vários caminhos, não apenas pelo caminho directo. O que provoca a existência dessa propagação multi-percurso é a presença de características como a reflexão e dispersão no ambiente de propagação. A distribuição de *Rayleigh* é aplicada quando não há uma componente de sinal dominante, aplicando a distribuição de *Rice* nestes casos. A função densidade de probabilidade $p(r)$ do sinal recebido em termos de amplitude r corresponde à distribuição de *Rayleigh* e é dada pela seguinte fórmula [Rap02]:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) (0 \leq r \leq \infty) \quad (3.11)$$

$$p_R(r) = 0 \quad (r < 0) \quad (3.12)$$

onde o parâmetro σ^2 representa fisicamente a potência média do sinal que chega à antena receptora.

3.4.2.2. Rice

Em situações em que nem todas as componentes de sinal resultantes de propagação multi-percurso chegam à antena receptora com a mesma amplitude, ou seja, nem todos os raios sofrem as mesmas perdas de propagação, a distribuição de probabilidade de *Rayleigh* já não pode ser aplicada.

Na presença de uma componente de sinal dominante que atinge a antena receptora com uma amplitude muito superior às restantes, como a componente directa que não tem qualquer reflexão ou dispersão, é aplicada a distribuição de *Rice* [Rap02]:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad (0 \leq r \leq \infty) \quad (3.13)$$

$$p_R(r) = 0 \quad (r < 0) \quad (3.14)$$

onde A representa a amplitude da componente dominante, σ^2 é a potência da componente de espalhamento e $I_0(.)$ é função de Bessel modificada de primeira ordem.

A distribuição de *Rice* é geralmente caracterizada em termos de um parâmetro K definido como o quociente entre a potência dominante e a potência da componente de espalhamento. Esse parâmetro é dado por:

$$K(dB) = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ dB} \quad (3.15)$$

Quando $A \rightarrow 0$, $K \rightarrow \infty$ dB, a componente dominante é eliminada levando a que a distribuição de *Rice* degenere numa distribuição de *Rayleigh*.

3.5. Norma 802.15.4 – Nível Físico

A norma 802.15.4 [802.15.4] define tanto a camada física como a camada de controlo de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*) dos nós sensores, embora a camada MAC

tenha já sofrido várias melhorias, o que tem levado à evolução da norma e à criação de novos protocolos.

Nesta secção é apresentada a camada física da norma, a qual está directamente relacionada com a qualidade de propagação de sinais em redes de sensores sem fios.

A norma 802.15.4 foi desenvolvida para redes sem fios com taxas de transferência baixa, nomeadamente redes de sensores sem fios.

Uma das características que mais se destaca na norma relativamente à camada física são as frequências de operação:

Tabela 3.1 – Frequências de operação da norma 802.15.4.

<i>Frequência</i>	<i>Taxa de transmissão</i>	<i>Zona de utilização</i>	<i>Modulação</i>
<i>2,4GHz</i>	<i>250kbps</i>	<i>Internacional</i>	<i>O-QPSK</i>
<i>915MHz</i>	<i>40kbps</i>	<i>América</i>	<i>BPSK</i>
<i>868MHz</i>	<i>20kbps</i>	<i>Europa</i>	<i>BPSK</i>

Além das características apresentadas associadas às várias gamas de frequências, falta ainda referir os canais utilizados por cada uma.



Figura 3.8 - Canais utilizados na frequência 868MHz (Canal 0).

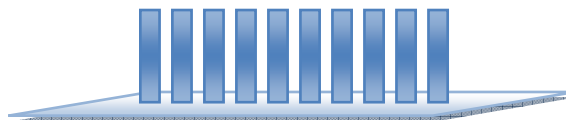


Figura 3.9 - Canais utilizados na frequência 915MHz (Canal 1 a 10) com espaçamento de 2MHz.

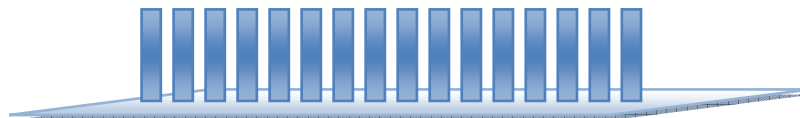


Figura 3.10 - Canais utilizados na frequência 2.4GHz (Canal 11 a 26) com espaçamento de 5MHz.

Observa-se pelas figuras 3.8 a 3.10 que o aumento do número de canais por frequência é proporcional à frequência usada. Para uma frequência de 2.4 GHz estão disponíveis 16

canais, o que permite implementações de protocolos que utilizem os vários canais de forma a diminuir a possibilidade de interferência entre transmissões.

CAPÍTULO 4.

Protocolo MMH-MAC

Neste capítulo é descrito em detalhe o funcionamento do protocolo MMH-MAC e são apresentadas as contribuições da dissertação em relação à sua evolução e implementação. As próximas secções abordam o processo de comunicação dos nós a funcionar em modo assíncrono e a funcionar em modo síncrono, e o processo de transição do modo de funcionamento. As últimas secções abordam a implementação do protótipo do protocolo em TinyOS.

4.1. Introdução

O protocolo MMH-MAC (*Mobile Multimode Hybrid MAC*) [Ber10] foi desenvolvido sobre o protocolo MH-MAC [Ber07] com a adaptação a redes de sensores compostas por nós fixos e nós móveis. O MMH-MAC foi optimizado para cenários onde nós colectores móveis atravessam um determinado espaço com o objectivo de recolher informação fornecida por nós estáticos existentes, para posterior análise e tratamento.

Tanto o protocolo MH-MAC como o protocolo MMH-MAC têm um modelo de funcionamento híbrido, onde os nós podem operar com ou sem sincronismo temporal, sendo esta configuração efectuada através de uma interface *cross-layer* que permite à camada applicacional controlar a camada MAC e também receber eventos da camada MAC. O

protocolo tem o objectivo de garantir uma comunicação eficiente entre nós, independentemente se estes estão no mesmo modo de funcionamento ou não.

Os nós adaptam-se à carga existente na rede alterando o seu modo de funcionamento. Em situação de elevada carga, os nós operam no modo síncrono de forma a permitir a maximização do *throughput* (débito). Em transmissões de dados em rajada, os nós poderão operar em modo assíncrono, tendo assim um consumo energético reduzido.

A inovação presente no protocolo MMH-MAC relativamente ao protocolo MH-MAC é uma rápida agregação de nós móveis a *clusters* (grupos) de nós estáticos, de forma a manter um elevado *throughput* em situações de tráfego periódico ou em rajadas, mantendo sempre uma elevada eficiência energética.

O protocolo procura também lidar com os *drifts* de relógio existentes nos nós, garantindo um rápido alinhamento do relógio dos nós móveis em relação aos nós presentes em um *cluster* síncrono.

4.2. Estrutura do Protocolo MMH-MAC

Uma rede de sensores sem fios poderá ser composta somente por nós estáticos, somente por nós móveis ou ambos. Assim sendo, o protocolo MMH-MAC foi concebido para permitir operar numa rede de sensores sem fios independentemente do modo de funcionamento dos sensores, e ajustando-se à quantidade e periodicidade de tráfego existente na rede.

Em caso de ausência de dados para transmitir, os nós operam em modo assíncrono, de forma a manter um reduzido consumo energético. Em situações de elevado tráfego, ou tráfego periódico, os nós operam em modo síncrono.

O modo de funcionamento pode ser definido pela aplicação através de uma interface *cross-layer*.

A mobilidade implica que nós que em um momento poderão ser parte integrante de uma rede, em poucos segundos poderão deixar de o ser. Este factor obriga a que o protocolo MMH-MAC, para lidar com mobilidade dos nós, tenha mecanismos de descoberta e detecção de perda de vizinhança. Alterações na vizinhança de um nó poderão induzir uma alteração do modo de funcionamento, devendo esta ser efectuada no menor intervalo de tempo possível.

As próximas secções abordarão os dois modos de funcionamento do protocolo.

4.3. Modo Assíncrono

O modo assíncrono do protocolo MMH-MAC está desenvolvido para suportar tráfego esporádico e manter uma elevada eficiência energética. Foi mantido o comportamento do protocolo MH-MAC, cujo modo de funcionamento assíncrono foi desenvolvido tendo como pilar o protocolo X-MAC [Bue06].

O modo assíncrono do protocolo MMH-MAC utiliza um algoritmo LPL (*Low Power Listening*) idêntico ao utilizado no protocolo X-MAC. É enviada uma sequência de pequenos preâmbulos, espaçados entre si por um período aleatório, durante um intervalo de tempo máximo de duas vezes o período de *duty-cycle*. Esta sequência antecede o envio dos pacotes de dados. Os preâmbulos têm como propósito acordar os nós vizinhos para que os mesmos possam detectar a existência de um nó que pretende transmitir informação.

Se a transmissão de dados for apenas para um destino, se for uma transmissão *unicast*, o nó receptor fica a ter conhecimento de ser o destino da mensagem através de um campo do preâmbulo que identifica o destino da mensagem. O receptor ao receber um preâmbulo e identificar que a mensagem a ele se destina, envia uma confirmação do preâmbulo (PACK) ao emissor. O emissor ao receber o PACK, termina o envio de preâmbulos e procede ao envio dos dados. Este mecanismo permite diminuir o tempo de envio de preâmbulos, e por consequência, uma diminuição do consumo energético do nó emissor. O envio do pacote PACK permite que o tempo de início de envio de preâmbulos até ao fim do envio da mensagem seja mais curto.

Uma evolução presente no protocolo MH-MAC (e por consequência, presente no protocolo MMH-MAC) relativamente ao protocolo X-MAC é a presença do tempo até iniciar o envio de dados nos preâmbulos. Em *unicast*, este tempo é utilizado para nós que não sejam receptores de uma mensagem mas que tenham recebido algum preâmbulo possam ficar no estado adormecido até ao fim do envio dos dados, evitando assim que interfiram com a transmissão que está a decorrer.

Após receber os dados, o receptor mantém-se no estado activo por mais um curto período de tempo para que, no caso de o emissor pretender continuar a enviar dados para o mesmo nó, este já se encontre no estado activo, não sendo necessário esperar que o nó receptor transite para o estado activo e receba um preâmbulo para ficar no estado activo pronto a receber mais dados.

A figura seguinte ilustra o processo de transmissão de dados *unicast* quando os nós se encontram a funcionar em modo assíncrono. É visível pela imagem que a transmissão de preâmbulos é interrompida por um pacote PACK. Após a recepção deste pacote, o emissor procede de imediato ao envio dos dados. Outros nós na vizinhança do emissor que não sejam

o destino dos dados, ao receberem um preâmbulo com a identificação do nó de destino e ao verificarem que é outro nó, permanecem em estado inactivo até ao fim da transmissão dos dados.

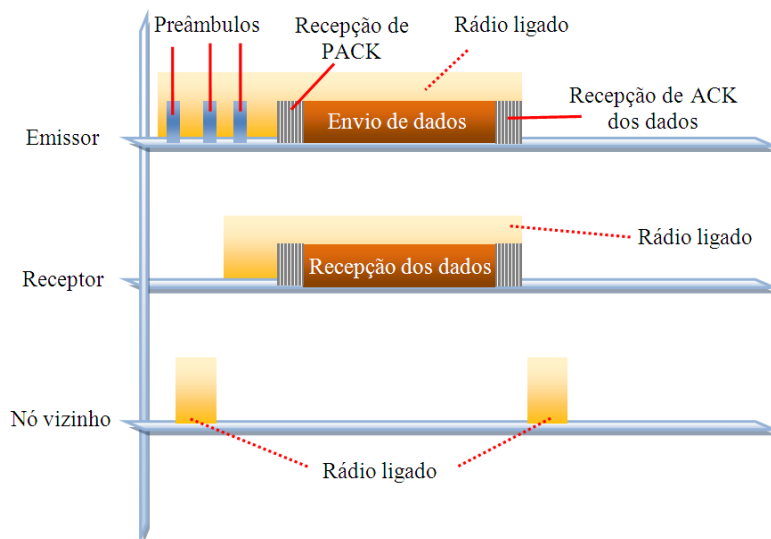


Figura 4.1 - Transmissão *unicast* com os nós a funcionar em modo assíncrono.

Relativamente à transmissão em *broadcast*, a principal diferença é que a duração da transmissão de preâmbulos é sempre duas vezes o período de *duty-cycle*, de forma a acordar todos os nós vizinhos do emissor. Em *broadcast*, o tempo até o início de envio de dados presente nos preâmbulos permite que um nó ao receber um preâmbulo, possa adormecer e acordar apenas um pequeno instante antes de o emissor proceder ao envio dos dados. Desta forma, optimiza-se o consumo energético dos nós.

A figura seguinte exemplifica o processo de transmissão *broadcast* quando os nós se encontram a operar em modo assíncrono. A duração do envio de preâmbulos é sempre 2,2s, ao contrário da transmissão em *unicast*, que pode ser interrompida assim que o nó de destino recebe um preâmbulo. Esta duração fixa tem como objectivo acordar todos os nós vizinhos, os quais serão o destino dos dados. Observa-se também um período de adormecimento por parte dos receptores. Ao receberem um preâmbulo, desligam o rádio até momentos antes do início da transmissão dos dados. Este período de adormecimento é determinado com base no tempo até ao envio dos dados enviados pelo emissor nos preâmbulos.

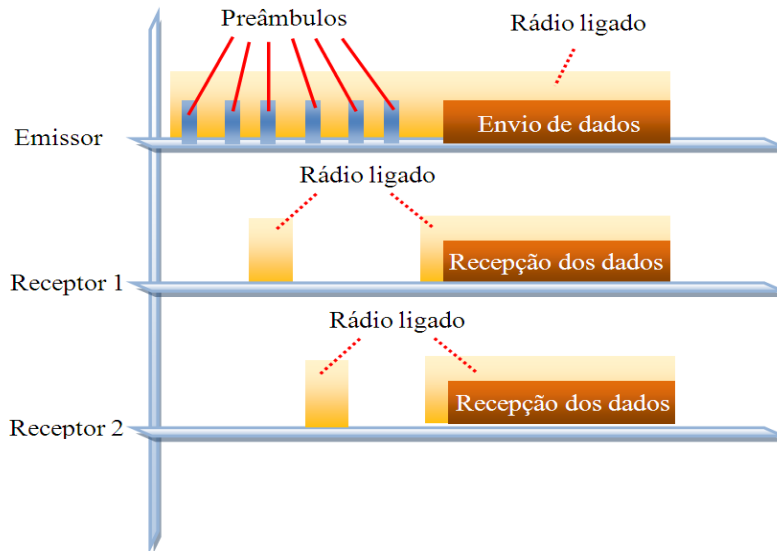


Figura 4.2 - Transmissão *broadcast* com nós a funcionar em modo assíncrono.

O protocolo MMH-MAC lida com a colisão de preâmbulos através do uso de um pacote denominado SHUT UP. O envio deste pacote é espoletado quando um receptor recebe mais que um preâmbulo no período de 15ms, com origem em mais que um emissor. O nó emissor escolhido para se manter no estado activo é o nó a partir do qual forem recebidos mais preâmbulos, e em caso de empate, o nó com menor ID.

O pacote SHUT UP contém o endereço do nó emissor escolhido para continuar o envio de pacotes. Assim sendo, apenas é necessária uma trama para que um nó se mantenha activo e todos os restantes transitem para o estado inactivo.

Ao receber o pacote SHUT UP, o emissor espera durante 15ms pela recepção de mais mensagens deste tipo. Se não receber mais pacotes SHUT UP, o nó verifica se o endereço inserido no pacote corresponde ao seu. Em caso afirmativo, continua o envio de preâmbulos. Caso contrário, termina o envio de preâmbulos, transitando para um estado adormecido. No caso de receber várias mensagens SHUT UP durante o intervalo de 15ms, o nó identifica qual o ID do nó que deve permanecer activo (que será o nó com menor ID). Continua o envio de preâmbulos se corresponder ao seu ID, caso contrário, termina o envio dos mesmos.

O pacote SHUT UP foi criado para evitar colisões entre preâmbulos, mas os pacotes SHUT UP também podem colidir com outros pacotes SHUT UP ou com preâmbulos emitidos simultaneamente. De forma a diminuir a ocorrência de colisões, aplicou-se uma aproximação probabilística no envio de pacotes SHUT UP. Um pacote é enviado com uma probabilidade p_{shutup} calculada através da seguinte expressão:

$$p_{shutup} = \min\left(\frac{1}{1 + neig}; 0.7\right) \quad (4.1)$$

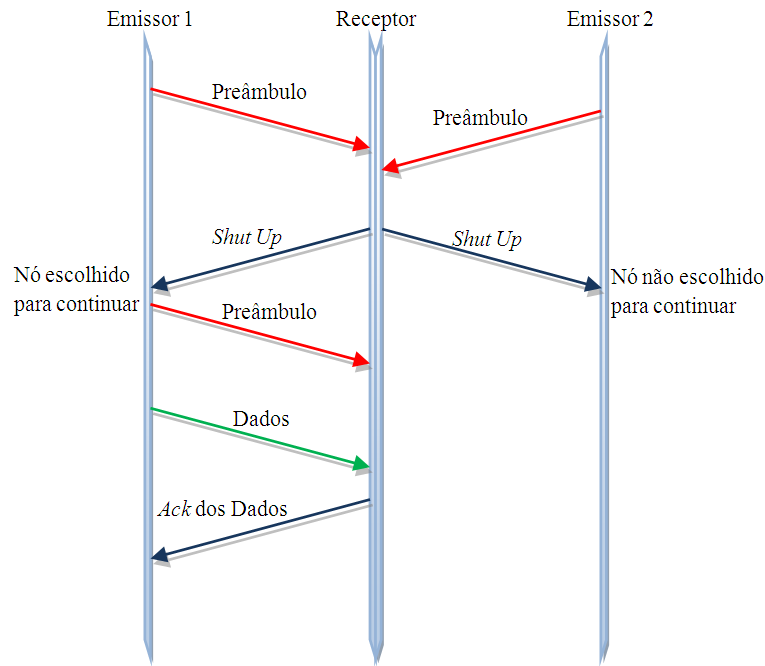


Figura 4.3 - Funcionamento do mecanismo para evitar colisão de preâmbulos.

4.4. Modo Síncrono

O modo síncrono tem como principal objectivo garantir a transmissão de um elevado volume de dados entre diversos nós dispersos pela rede, no menor intervalo de tempo possível.

De forma a suportar a mobilidade dos nós, o modo síncrono do protocolo MMH-MAC apresenta métodos de descoberta de vizinhos, detecção de ruptura de ligação, gestão de sincronização em diversos *clusters* com a possível entrada e saída de nós.

A estrutura considerada tem por base uma arquitectura TDMA, baseado num esquema de *slots*. Essa estrutura é constituída por uma trama de 11 *slots* temporais, cada um com a duração de 100ms, perfazendo um *duty-cycle* de 1.1s. Dez dos onze *slots* que constituem a trama estão destinados a transmissão *unicast*. Estes são *slots* privados alocados entre dois vizinhos, de forma a garantir a inexistência de colisões de pacotes. Durante o *slot* privado, os nós escutam o canal durante os primeiros 25ms. No caso de não detectarem qualquer transmissão, o nó transita para o estado adormecido, aumentando assim a eficiência energética. No caso de um nó emissor, este escuta o canal durante um certo intervalo de tempo, de forma a diminuir a probabilidade de colisões que poderão ocorrer quando existem outros nós na periferia a operar em modos de funcionamento diferentes. Todas as mensagens enviadas em *unicast* são confirmadas por parte do receptor. O protocolo contempla a possibilidade de os nós poderem alocar mais que um *slot* privado. Essa decisão é tomada pela aplicação, através de uma interface *cross-layer*.

O *slot* público está destinado ao envio de mensagens de controlo, de manutenção de sincronismo, transmissão em *broadcast* podendo ser utilizado também para transmissões em *unicast*. Um nó pode ter alocado vários *slots* públicos, dependendo do número de *clusters* aos quais pertence. A estes nós acresce a função de gestão e manutenção da interface entre os diversos *clusters*, referido numa próxima secção.

Também neste *slot*, o nó escuta o canal antes de proceder ao envio dos dados, já que todos os nós do *cluster* podem recorrer ao *slot* público para o envio de dados. O problema do nó escondido é evitado recorrendo ao mecanismo RTS/CTS antecedendo o envio dos dados, sendo os pacotes de dados confirmados.

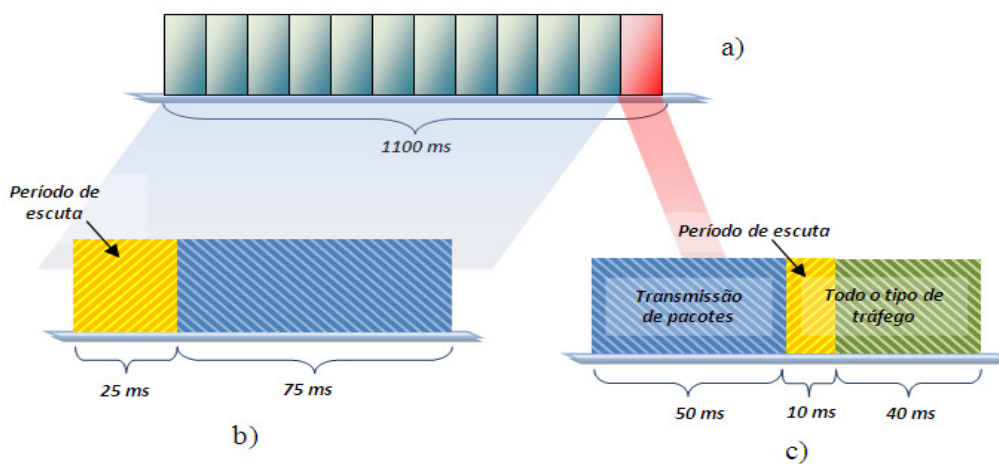


Figura 4.4 - Estrutura de a) trama de slots síncronos b) slot dedicado c) slot público

A manutenção de sincronismo entre os nós é efectuada recorrendo ao envio periódico de uma mensagem SYNC, enviada nos primeiros 50ms do *slot* público.

Os nós mantêm uma tabela com os SYNC recebidos, e é através da ausência de pacotes SYNC que os nós detectam a perda de vizinhos. Como é um pacote periódico, a não recepção deste durante um intervalo de tempo correspondente a 2.5 períodos de envio de SYNC (período definido pela aplicação, sendo este um múltiplo do período de *duty-cycle*) leva a que a tabela de vizinhos de um nó seja actualizada, libertando assim os *slots* privados que estivessem alocados para transmissões entre o próprio e um ex-vizinho.

A libertação de *slots* privados pode ser solicitada através da aplicação. A aplicação, ao enviar uma mensagem ao nó para transitar para modo assíncrono, envia em *broadcast* o pedido de dessincronização, para que os nós com os quais partilhasse algum *slot* privado o libertassem.

Como já referido, o envio dos pacotes SYNC ocorre dentro dos primeiros 50ms do *slot* público. Esse intervalo de tempo é dividido em cinco partes de 10ms cada, e o emissor escolhe aleatoriamente um desses *slots* de 10ms no qual envia o pacote SYNC. Desta forma,

procurou-se reduzir a probabilidade de colisão de pacotes SYNC, e permitir o envio de no máximo cinco pacotes SYNC sem a ocorrência de colisões.

A figura 4.5 ilustra um possível esquema de alocação de *slots*.

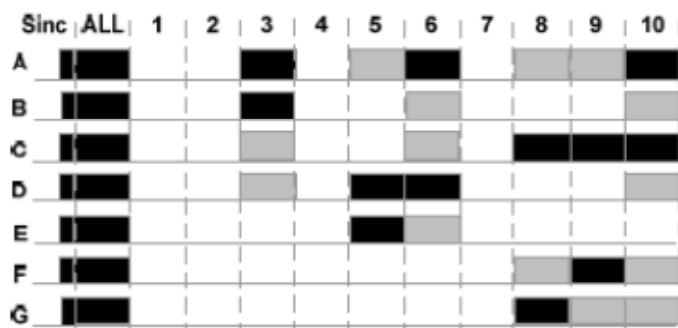


Figura 4.5 - Exemplo de alocação de *slots* [Ber07].

O processo de alocação de *slots* é referido nas próximas secções, onde são abordados os métodos de transição de estados entre nós sensores.

4.5. Transição de Modo de Funcionamento

Para que um nó móvel possa associar-se rapidamente a um *cluster* síncrono é fundamental um protocolo para transição de modo de funcionamento otimizado para nós que permaneçam dentro do alcance de um *cluster* síncrono por um curto período de tempo.

Nas secções seguintes são analisados os protocolos de sincronização dos nós quando é efectuada a associação de um nó móvel assíncrono a um *cluster* síncrono assim como a sincronização entre nós a operar em modo assíncrono.

4.5.1. Sincronização entre Nós Assíncronos

Quando na vizinhança de um nó cujo modo de funcionamento seja assíncrono se encontram apenas nós a funcionar no mesmo modo, a sincronização ente os nós inicia-se com a transmissão de preâmbulos por parte do nó que pretende sincronizar para toda a sua vizinhança. O envio de preâmbulos ocorre durante duas vezes o período de *duty cycle*. Esta duração fixa prende-se com o objectivo de acordar todos os nós na vizinhança.

Terminado o envio de preâmbulos, e assumindo que todos os nós na vizinhança estão activos, procede-se ao envio do pacote HELLO, o qual pode ser enviado em *broadcast* ou *unicast* (a definir pela aplicação) consoante os nós com os quais é pretendido estabelecer sincronização.

O pacote HELLO, através do campo *slot reserve bit (SRBit)*, determinará se durante o processo de sincronização será também efectuada alocação de *slots* dedicados. No caso de não ser efectuada a alocação no processo de sincronização, poderá ser posteriormente solicitada pela aplicação, e será espoletada no *slot* público.

Após o envio do pacote HELLO, é desencadeado o processo de descoberta de vizinhança e de alocação de *slots*, quando assim solicitado. Este processo ocorre com a troca dos pacotes REQUEST/OK, no tempo máximo de 1.1s. Durante este período, o rádio dos nós intervenientes na sincronização está permanentemente ligado.

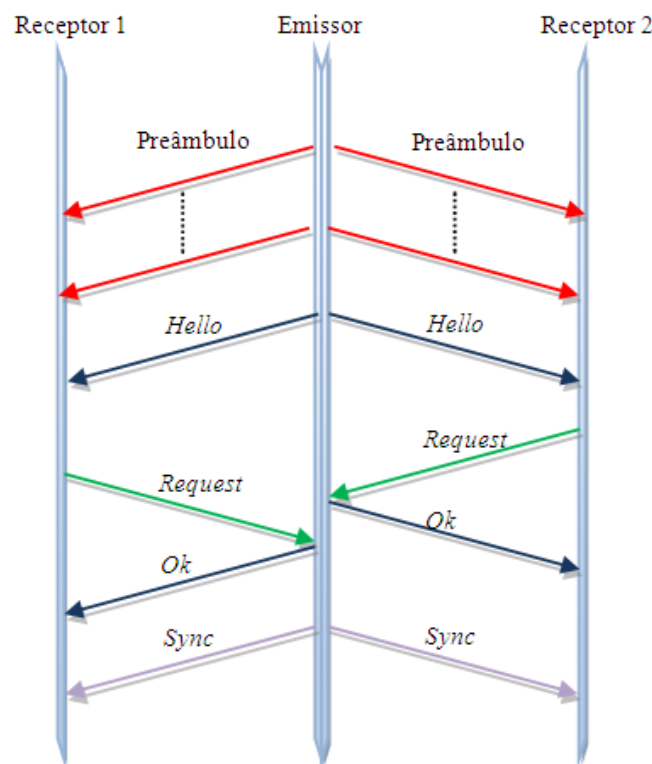


Figura 4.6 - Processo de sincronização quando todos os nós se encontram a operar em modo assíncrono.

Pela figura 4.6, observa-se que os nós receptores, após receberem o pacote HELLO, esperam um tempo aleatório (ente 0s e 1s) para procederem ao envio do pacote REQUEST. Foi estipulado um tempo aleatório para diminuir a probabilidade de colisão entre pacotes REQUEST.

É o pacote REQUEST que permite ao nó que origina o processo de sincronização saber da existência de nós na sua vizinhança. Se o nó receptor não receber um pacote OK durante um determinado período após o envio do pacote REQUEST, reenvia o pacote REQUEST.

Outra situação possível surge quando o nó receptor não aceita o pedido de sincronização. Neste caso, não envia o pacote REQUEST, e o nó emissor não fica a conhecer a existência desse nó na sua vizinhança.

Se a troca dos pacotes REQUEST /OK não for completada dentro do período estipulado, os nós mantêm a sincronização dos relógios, embora não seja alocado qualquer *slot* privado entre os nós intervenientes. A alocação de *slots* ficará agendada para a próxima ocorrência do *slot* público, recorrendo aos pacotes REQUEST /OK. O pacote REQUEST, à semelhança do pacote HELLO, contém o parâmetro *SRBit*, bem como a lista de *slots* ocupados por vizinhos do nó emissor.

A gestão da alocação de *slots* pode ser efectuada pela camada MAC, ou através da interface *cross-layer*, pela camada aplicacional.

4.5.2. Sincronização em *Cluster* Síncrono

Na secção anterior, todos os nós participantes na sincronização encontravam-se inicialmente a funcionar em modo assíncrono. Nesta secção é apresentado o protocolo de sincronização quando apenas o nó que inicia o sincronismo está a funcionar em modo assíncrono, estando os restantes em modo síncrono.

Este processo de sincronização é a grande evolução do protocolo MMH-MAC face ao protocolo MH-MAC. Era necessário criar um mecanismo que permitisse a um nó assíncrono sincronizar-se rapidamente com um *cluster* síncrono, ao entrar na sua vizinhança de trocar a informação pretendida e voltar a sair do *cluster*, retornando ao modo de funcionamento inicial.

O protocolo MMH-MAC implementa dois métodos para um nó assíncrono se sincronizar com um *cluster* síncrono: o método passivo, em que o nó assíncrono aguarda a recepção de um pacote SYNC, e o método activo, onde o nó assíncrono força o estabelecimento de sincronismo com o *cluster* síncrono na sua vizinhança.

O método passivo torna-se bastante lento. Para que o nó assíncrono receba um pacote SYNC, é necessário que, cumprindo o seu *duty-cycle*, acorde no período onde existe troca de pacotes SYNC dentro do *cluster* síncrono. Este método, para nós móveis que exigem rápida sincronização com nós fixos, pode ser falível, e não permitir sequer sincronizar em tempo útil, no período em que o nó móvel se encontra na vizinhança do *cluster* síncrono.

No método activo, o processo de sincronização ocorre mais rapidamente, cobrindo as lacunas do método anterior. Este processo de sincronização desencadeia-se com o envio constante de preâmbulos durante 2.2s por parte do nó móvel, até que algum nó do *cluster* síncrono na sua vizinhança envie um pacote SHUT UP especial. O nó síncrono, após o envio

do pacote SHUT UP, envia um pacote SYNC. O envio dos pacotes por parte do nó síncrono, pode ocorrer tanto em *slots* dedicados como no *slot* público.

Após a fase inicial do processo de sincronização, ocorre uma troca de pacotes REQUEST/OK para alocação de *slots* dedicados, terminando assim o processo de sincronização.

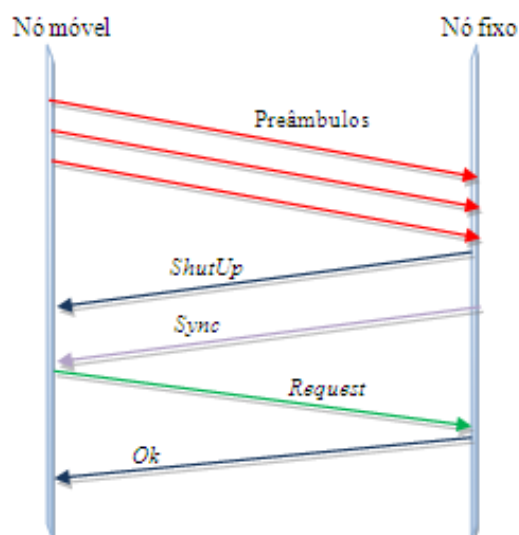


Figura 4.7 - Troca de mensagens efectuada no processo de agregação de um nó móvel a um *cluster* síncrono (método activo).

O tempo de sincronização no método activo está condicionado ao tempo necessário até que o nó síncrono receba os preâmbulos do nó móvel, que corresponde ao período até o nó síncrono ligar o rádio, num próximo *slot* dedicado, ou, em caso de ocorrer mais rapidamente, no *slot* público.

Um mecanismo que permite um processo de sincronização ainda mais rápido consiste no acordar do nó síncrono nos *slots* dedicados que não estão alocados por um curto período de tempo de forma a escutar o canal e detectar mais rapidamente a transmissão de preâmbulos. Embora provoque diminuição na eficiência energética, acelera consideravelmente o processo de sincronização.

4.5.3. Dessincronização

Um nó pode passar do estado assíncrono para o estado síncrono através dos mecanismos apresentados anteriormente. Nesta secção pretende-se abordar o processo contrário, ou seja, como um nó síncrono pode transitar para um modo de funcionamento assíncrono e quais os impactos no restante *cluster* síncrono.

A aplicação pode decidir qual o modo de funcionamento em qual o nó deve operar, sendo a aplicação quem decide quando um nó deve perder o sincronismo com o *cluster*. O processo origina o envio de uma mensagem DSYNC em *broadcast* para que os nós vizinhos com os quais mantinha sincronismo possam libertar os *slots* alocados para si. Logo de seguida, o nó pode então começar a operar no modo assíncrono.

O envio da mensagem DSYNC é efectuado no primeiro *slot* activo. No caso de um *slot* dedicado, é solicitada a libertação de recursos ao nó com o qual existe partilha de *slot*. Se o primeiro *slot* activo for o *slot* público, é requisitada a libertação dos *slots* dedicados a todos os vizinhos com os quais partilhava um *slot* dedicado.

Quando é terminado o processo de dessincronização e o nó já se encontra a funcionar em modo assíncrono, a camada MAC envia uma mensagem à aplicação a informar da alteração do modo de funcionamento.

4.5.4. Detecção de Perda de Vizinhança

Comum em redes de sensores sem fios com nós móveis é a entrada de um nó assíncrono num *cluster* síncrono, estabelecer sincronização para troca de dados, e, devido à mobilidade dos nós, abandonar o *cluster* síncrono. A libertação de recursos, de *slots* dedicados, acontece se o nó móvel, quando ainda estiver no interior do *cluster* síncrono solicitar dessincronizar com os seus vizinhos (secção anterior), ou, se o nó móvel não solicitar a dessincronização com os restantes nós, os seus vizinhos detectarão através da não recepção de pacotes SYNC que o nó móvel já não está na sua vizinhança. A libertação de recursos ocorre após 2.5 períodos de envio do último SYNC. Este método provoca um atraso superior ao apresentado na secção anterior, embora, numa situação em que o pacote DSYNC não chega ao destino, este método soluciona o problema de alocação de recursos.

4.5.5. Implementação

Nesta dissertação foi realizada uma nova implementação do protocolo MMH-MAC especificamente para correr nos sensores TelosB. A implementação original [Ber10] tinha sido efectuada para suporte à realização do estudo do MMH-MAC no simulador TOSSIM, que visava simular o funcionamento dos nós sensores TelosB. No entanto, esta implementação tinha diversos problemas a nível de sincronismo quando corria nas plataformas de sensores sem fios. No presente trabalho, a nova implementação foi realizada faseadamente, tendo sido modificado o código original realizado para o simulador, para correr de forma fidedigna tanto no simulador como nas plataformas de *hardware*.

As alterações fundamentais realizadas tiveram em conta que a implementação estava a ser efectuada em nós TelosB e prenderam-se com o ajuste dos tempos necessários para a realização de tarefas. Foi necessário acrescentar atrasos temporais de forma a permitir introduzir períodos de tempo entre o envio de mensagens, ou até mesmo entre a execução de tarefas. Apresenta-se de seguida um excerto de código desenvolvido para o envio de mensagens.

```
task void EnviarMensagem() {
    am_addr_t send_msg_id;
    if (!INTERFACE){
        call TestTimer.startOneShot(TIME2SENMESSAGE);
        send_msg_id = call AMPacket.destination(&currentMsg);
    }
    else{
        call TestTimer.startOneShot(TIME2SENMESSAGE);
        send_msg_id = call AMPacket.destination(currentMsgApontador);
        INTERFACE=FALSE;
    }
    //.....//
}

event void TestTimer.fired(){
    if (!locked){
        if(INTERFACE){
            if (TYPE3==TRUE)
                sendMessageType3(currentAddr,&currentMsg,currentLen);
            else if (TYPE3==FALSE)
                sendMessageType1(currentAddr,&currentMsg,currentLen);
        }
        else if (!INTERFACE){
            if (TYPE3==TRUE)
                sendMessageType3(currentAddr,currentMsgApontador,currentLen);
            else if (TYPE3==FALSE)
                sendMessageType1(currentAddr,currentMsgApontador,currentLen);
        }
    }
}
```

Figura 4.8 - Excerto de código referente ao envio de mensagens desenvolvido para o *hardware*.

```
task void EnviarMensagem() {  
    am_addr_t send_msg_id;  
    if (!INTERFACE){  
        if (TYPE3==TRUE)  
            sendMessageType3(currentAddr,currentMsgApontador,currentLen);  
        else if (TYPE3==FALSE)  
            sendMessageType1(currentAddr,currentMsgApontador,currentLen);  
        send_msg_id = call AMPacket.destination(&currentMsg);  
    }  
    else{  
        if (TYPE3==TRUE)  
            sendMessageType3(currentAddr,&currentMsg,currentLen);  
        else if (TYPE3==FALSE)  
            sendMessageType1(currentAddr,&currentMsg,currentLen);  
        send_msg_id = call AMPacket.destination(currentMsgApontador);  
        INTERFACE=FALSE;  
    }  
    .....  
}
```

Figura 4.9 - Excerto de código referente ao envio de mensagens desenvolvido para o simulador.

CAPÍTULO 5.

Análise de Desempenho

Após uma breve introdução teórica das características dos modelos de propagação, são apresentados neste capítulo os resultados experimentais obtidos, assim como os modelos matemáticos que demonstram as características de propagação de sinais em redes de sensores sem fios no ambiente usado para testes.

Apresenta-se também os resultados obtidos relativamente ao débito estando os nós a operar em modo assíncrono e modo síncrono.

5.1. Cenário de Testes

Nesta secção são descritos tanto o material, *software* e protocolos utilizados para a realização das experiências, como uma descrição detalhada e ilustrada do ambiente de propagação seleccionado.

5.1.1. Material

A rede de sensores sem fios que foi utilizada para a experiência estava dotada de três nós sensores TelosB [TelosB] (Figura 5.1) alinhados. Estes dispositivos estão dotados de um módulo de rádio CC2420 [CC2420] desenvolvido com base no protocolo 802.15.4, com uma

frequência de utilização de 2.4GHz, modulação O-QPSK e uma taxa máxima de transmissão de 250kbps.

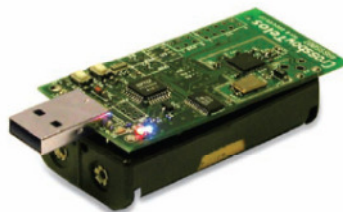


Figura 5.1 - TelosB.[TelosB].

Outro material utilizado foi um computador portátil, ligado a um dos nós sensores. Este computador foi necessário para a obtenção das medições efectuadas, assim como para espoletar o envio de mensagens.

5.1.2. Software

Os nós sensores foram programados recorrendo ao sistema operativo TinyOS. A versão do sistema operativo utilizada foi a versão TinyOS 2.0.

A linguagem de programação utilizada foi o nesC [Gay03] que é a linguagem suportada pelo TinyOS. Foi também necessário algum desenvolvimento de código Java de forma a permitir a utilização de uma interface gráfica, para mais facilmente enviar comandos para os nós sensores através da porta USB que liga o nó sensor ao computador.

Em termos de aplicação, a mesma foi desenvolvida sobre o protocolo MMH-MAC, com as alterações indicadas a seguir para que fosse possível proceder aos testes pretendidos. Os três nós presentes nestes testes foram colocados inicialmente a operar em modo assíncrono. O processo de sincronização entre o nó emissor e o nó receptor começava através de um comando numa interface gráfica desenvolvida em Java. Este processo é iniciado pelo nó emissor. Além da sincronização, procedeu-se também à alocação de um *slot unicast* (optou-se pelo *slot 7* de forma a não ser um *slot* contíguo com o *slot* público) durante o processo de sincronização. Tendo o emissor sincronizado com o receptor, sincronizou-se com este *cluster* o nó interferente. O *slot* alocado foi também o *slot 7*, ficando assim os três nós a partilhar o mesmo *slot* privado. Foi necessária alterar o protocolo MMH-MAC para ser possível sincronizar mais que dois nós no mesmo *slot* privado. A manutenção de sincronismo foi assegurada pelo nó receptor, que enviava em todos os *slots* públicos um pacote SYNC.

O envio de pacotes no nó privado é desencadeado pelo nó receptor. Através do premir do botão presente nos nós TelosB, o nó receptor envia uma mensagem a solicitar o envio de pacotes. O nó emissor, ao receber esse pacote, desencadeia o envio de 5 pacotes em cada *slot*



Figura 5.3 - Localização do nó receptor.



Figura 5.4 - Fotografia do cenário de testes.

5.1.4. Implementação da Rede

Os três nós constituintes da rede foram alinhados em linha recta. Tanto o nó receptor como um dos nós emissores estavam em posições fixas, com uma distância de 2 metros entre eles. O terceiro nó assumiu várias posições: uma distância de 5 cm, e entre 2 e 16 metros com um intervalo entre valores de um metro. Não foram obtidas as medições a uma distância de 10 metros devido à dificuldade de estabelecer sincronismo entre os três nós. A figura seguinte ilustra a disposição dos nós fixos na rede implementada, assim como as posições assumidas pelo emissor com posição variante.

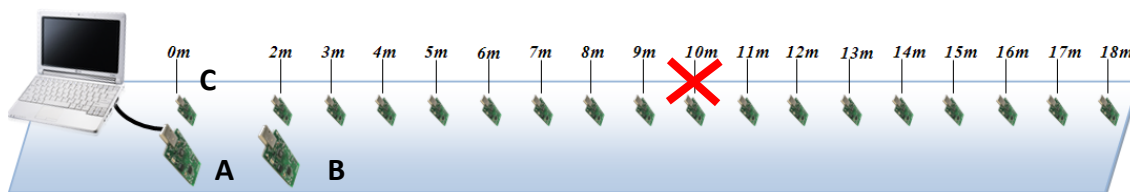


Figura 5.5 - Imagem representativa da rede e distâncias ocupadas pelos dois emissores relativamente ao receptor, ligado ao computador.

O protocolo de acesso ao meio (MAC) utilizado foi baseado no MMH-MAC. O protocolo MMH-MAC foi alterado de forma a ser possível manter três nós sincronizados no mesmo *slot* de 100ms. Inicialmente, os nós encontravam-se no modo assíncrono, sendo espoletado o processo de sincronização do protocolo. Após este passo, os nós ficam sincronizados e preparados para o envio de dados no *slot* de sincronismo.

O envio de pacotes do lado dos emissores (nós B e C) é espoletado através do envio de um pacote START inicial pelo nó A, o nó receptor, após comando da aplicação. Quando o pacote START é recebido pelos emissores, estes activam uma *flag*, o que fez com que durante um *slot* de 100ms da *frame* de 1100ms, fossem gerados e enviados 5 pacotes com um tamanho de 28 bytes cada ao nível da aplicação. O envio dos 5 pacotes foi repetido 10 vezes, perfazendo um total de 50 pacotes enviados por cada nó emissor para cada pacote START.

A presença do nó B, assumindo uma posição estática, tinha como objectivo a presença de um nó interferente na transmissão de pacotes entre o nó A e o nó B.

Para o estudo efectuado, foi escolhido o nível de potência de transmissão máximo, 0dBm.

De acordo com *datasheet* do módulo rádio CC2420, a potência P é determinada pela seguinte expressão:

$$P = RSSI_VAL + RSSI_OFFSET \quad [dBm] \quad (5.2)$$

Onde $RSSI_VAL$ é um valor obtido pelo registo $RSSI_VAL$ do módulo CC2420, e $RSSI_OFFSET$ é determinado empiricamente durante o desenvolvimento do sistema. É ainda referido que o valor desta variável deve ser aproximadamente -45 dBm.

No desenvolvimento do sistema que serviu de base ao estudo realizado nesta dissertação, o valor determinado para a variável $RSSI_OFFSET$ foi -40 dBm. Este valor foi obtido colocando 2 nós o mais próximo possível, de forma a obter uma potência de emissão igual à potência de recepção. A potência de emissão foi definida como sendo 0 dBm, e para que na recepção esse valor fosse idêntico, a variável $RSSI_OFFSET$ teria de assumir o valor de -40 dBm.

O tamanho dos pacotes, factor que pode influenciar a taxa de pacotes recebidos, foi de 28 bytes, que segundo [Lev07b] é o valor configurado por omissão pelo sistema operativo utilizado.

5.2. Resultados

Após a apresentação das características do cenário de testes, apresentam-se, nas próximas subsecções, os valores obtidos através da experiência assim como a aplicação de modelos matemáticos sobre esses valores.

5.2.1. Recolha de Resultados

Nesta secção são apresentados e interpretados os valores recolhidos durante a fase de testes. Assim sendo, para o ambiente de testes descrito na secção anterior, os valores obtidos foram os seguintes:

Tabela 5.1 - Valores medidos.

<i>Distância (m)</i>		<i>Média Potência Recebida (dBm)</i>				<i>Pacotes Recebidos</i>	
<i>Fixo</i>	<i>Móvel</i>	<i>Fixo</i>	<i>Nível Confiança 95%</i>	<i>Móvel</i>	<i>Nível Confiança 95%</i>	<i>Fixo</i>	<i>Móvel</i>
2	0,05	-63	0,71	-14	0,09	47	49
2	2	-58	1,06	-66	0,91	50	48
2	3	-59	0,24	-63	0,22	49	45
2	4	-58,5	0,85	-73	1,4	50	47
2	5	-61	0,91	-75	0,76	50	39
2	6	-69,5	0,83	-69	0,29	50	48
2	7	-61	0,24	-77	0,61	50	46
2	8	-60	0,66	-82	0,36	49	49
2	9	-59	0,6	-77	0,73	50	47
2	11	-57	0,96	-83	0,51	47	37
2	12	-61	0,79	-----	-----	50	0
2	13	-61	1,52	-79	0,36	46	47
2	14	-62,5	1,31	-77	0,24	50	47
2	15	-57	0,22	-84	0,21	50	50
2	16	-61	1,63	-82	0,98	49	30

Na tabela 5.1, para uma distância de 12m e 17m entre o nó móvel e nó receptor, não se conseguiu obter sucesso na transmissão de pacotes, impedindo a obtenção da potência do sinal para as distâncias referidas. À distância de 10m não foi possível recolher qualquer informação da potência recebida dado que não se conseguiu sincronizar os nós sensores.

5.2.2. Taxa de Recepção de Pacotes

Começando pela análise da taxa de recepção de pacotes (ou PRR – *Packet Reception Rate*), observa-se na tabela 5.1 que os pacotes enviados pelo nó fixo são praticamente todos bem recebidos, sendo perdidos apenas 13 pacotes num total de 800 enviados. A possível interferência provocada pelo nó móvel não contribuiu para a diminuição da taxa de recepção. Tal facto pode dever-se à baixa frequência de envio e ao tamanho dos pacotes não ser suficientemente grande para existirem colisões. Outra causa relevante está relacionada com o facto de os nós emissores não estarem totalmente alinhados temporalmente, o que provoca um desfasamento entre os períodos de emissão de pacotes. O gráfico da figura 5.6 ilustra a taxa de recepção de pacotes por parte do emissor relativamente à distância do nó móvel.

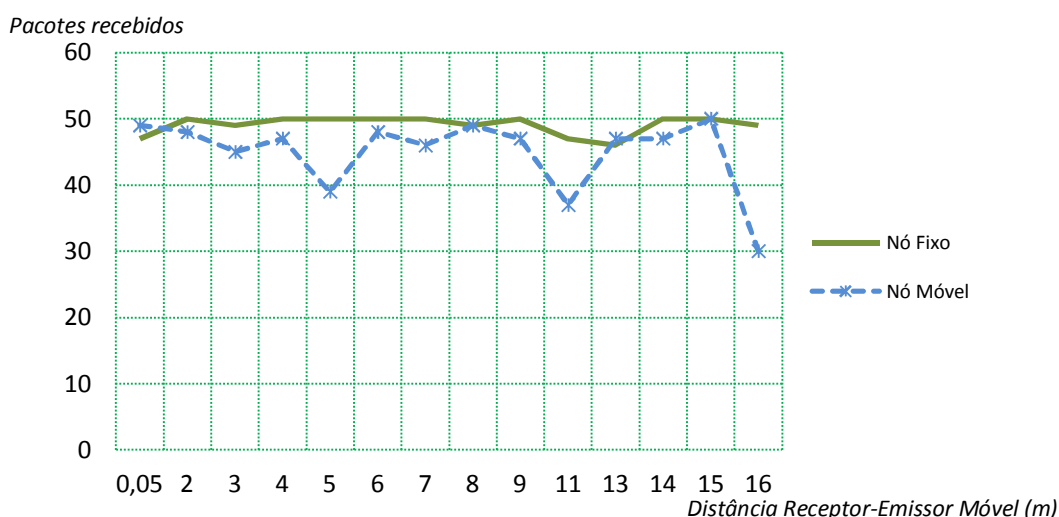
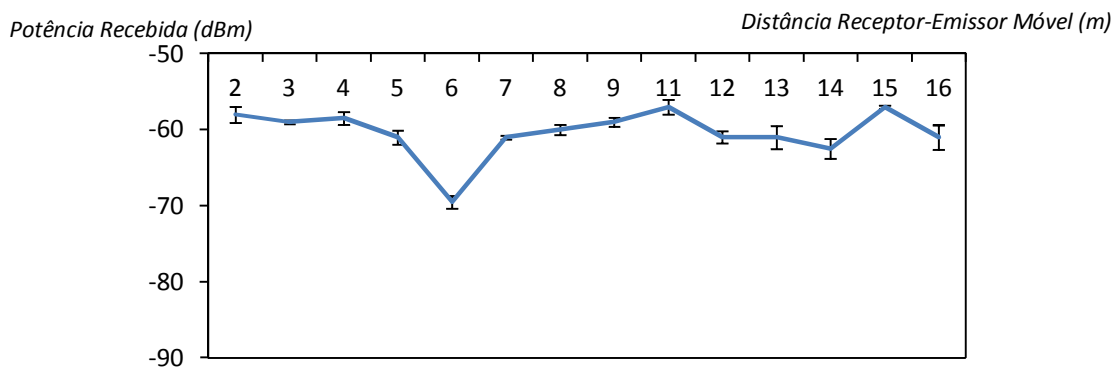


Figura 5.6 - Variação da taxa de recepção de pacotes.

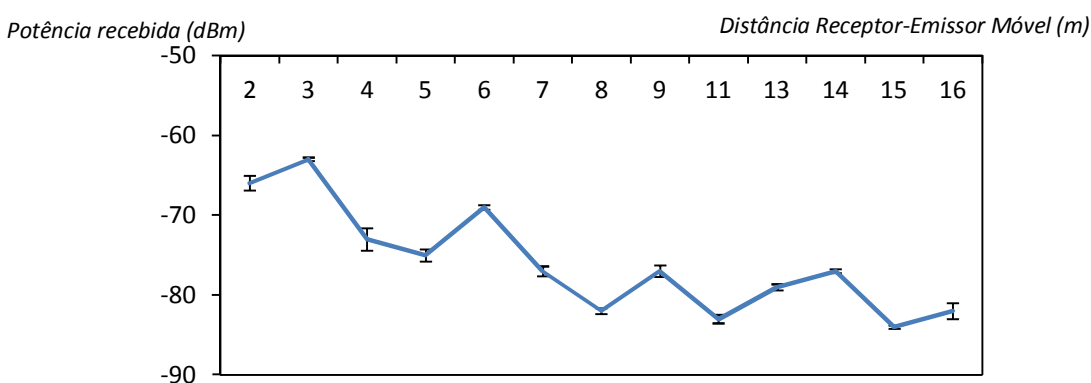
Observando a figura 5.6, verifica-se a estabilidade na taxa de recepção de pacotes quando o emissor é o nó fixo, que mantém a sua distância relativamente ao receptor. Relativamente ao nó móvel, cujo afastamento do nó receptor é referido no gráfico, a oscilação de pacotes recebidos por parte do receptor é muito superior, constatando-se mesmo a perda total de pacotes em distâncias intermédias, como é o caso da distância a 12 metros. Esta elevada oscilação permite verificar a presença de uma zona cinzenta entre os 10 metros (onde não foi possível sincronizar os nós) e os 12 metros, onde a perda de pacotes foi total. A partir dos 16 metros, a perda de pacotes começou a ser significativa, sendo que a partir dos 17 metros, a taxa de recepção de pacotes fixou-se a 0%, estando assim numa zona desligada.

5.2.3. Potência Recebida

Na tabela 5.1 apresentada na secção 5.2.1, foram mostrados os valores médios da potência recebida recorrendo à métrica RSSI. É possível verificar que não há uma variação significativa da potência recebida do emissor fixo com a distância do nó móvel. Nas figuras 5.7a) e 5.7b) são representados os valores médios, máximos e mínimos da potência recebida.



(a)



(b)

Figura 5.7 - Potência recebida do nó a) fixo e b) móvel e respectivo nível de confiança a 95%.

Pela análise dos gráficos apresentados, verifica-se que para a mesma distância, a potência da recepção apresenta uma componente aleatória possivelmente relacionada com a irregularidade do ambiente de propagação e a sensibilidade que um sinal transmitido tem relativamente ao meio onde se propaga.

A distância entre o nó móvel e o receptor não influenciou a potência recebida relativamente ao nó fixo. A potência média obtida no nó fixo para as várias posições do nó móvel, não sofreu grandes alterações no valor médio de todas as medições, que foi de -60,5 dBm. Relativamente ao nó móvel, observa-se pelo gráfico da figura 5.7b), que dado a sua

mobilidade, o aumento da distância entre este e o nó emissor influenciaram a potência recebida. A uma distância de 0,05m observou-se que a potência de recepção rondava os -15 dBm, decaindo para -65 dBm à distância de 2m. Esta diferença tão acentuada deve-se a um grande “salto” na distância, mas evidencia o impacto que a distância tem na potência de recepção nos nós sensores. Após os 2m, a diminuição da potência de recepção ocorreu de uma forma mais suave, embora em alguns casos, se verifique a oscilação da potência para a mesma distância, derivado da irregularidade do ambiente de propagação. A mesma causa provocou que aos 10 metros, não fosse recebido qualquer pacote.

5.2.4. Alcance

O estudo efectuado permitiu verificar que o alcance máximo de transmissão está dependente da orientação da antena. Neste estudo, o alcance máximo foi de 16 metros, muito afastado do alcance máximo apresentado em [Pol05], que ultrapassa a barreira dos 200 pés (aproximadamente 61 metros).

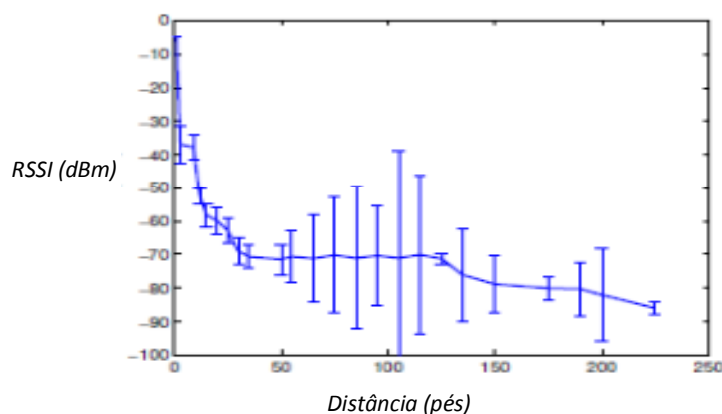


Figura 5.8 - Relação potência vs distância dos Telos [Pol05].

Esta diferença acentuada deve-se à posição em que a antena é colocada, assim como a altura a que se encontra relativamente ao solo.

No cenário de testes utilizado, a uma distância de 18 metros entre o receptor e o emissor, já o nó receptor não recebia pacotes do nó móvel. Alterando-se o cenário de testes, elevando os nós 70 centímetros relativamente ao solo, tornou-se possível recepcionar dados enviados pelo nó à distância de 18 metros, assim como aumentar o valor de potência recebida pelo nó fixo. A taxa de recepção de pacotes enviados pelo nó móvel passou de 0% para 80%, assim como a potência recebida do nó fixo aumentou de -60,5 dBm para -50 dBm.



Figura 5.9 - Taxa de pacotes recebidos com uma elevação dos nós em 70 centímetros e uma distância de 18 metros entre o nó móvel e o nó receptor.

5.2.5. Modelo de Propagação

Tendo por base os valores obtidos experimentalmente neste estudo, procedeu-se à determinação do modelo de propagação aplicável ao ambiente onde foram obtidas as medições. O modelo foi obtido com os valores relativos ao nó móvel, ignorando as medições obtidas relativamente ao nó fixo, após ter sido comprovada que a transmissão de pacotes de ambos os nós simultaneamente não provocou alteração de resultados.

Um dos modelos mais frequentemente utilizado em redes de sensores sem fios é o modelo *Log-Normal Shadowing* apresentado no capítulo anterior. Este modelo matemático para determinar a potência recebida contempla as irregularidades do ambiente de propagação.

A expressão matemática que representa este modelo é a seguinte:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (5.2)$$

São cinco as variáveis presentes na expressão. Nesta secção e nas próximas subsecções pretende-se apresentar e determinar todas as variáveis, para que se possa obter o modelo de propagação aproximado para o ambiente de testes referido nesta dissertação.

As perdas de propagação são determinadas em função da distância d , que representa a distância entre emissor e receptor. Um valor fixo presente na expressão do modelo é d_0 . Esta variável representa a distância de referência, que neste estudo se fixou nos 2 metros.

As variáveis que necessitam da aplicação de modelos matemáticos para serem determinadas são n (*Path Loss Exponent*), $PL(d_0)$ e X_σ , que é uma variável aleatória de distribuição Gaussiana de média nula e desvio padrão σ . As próximas duas subsecções são dedicadas ao cálculo destas variáveis.

5.2.5.1. *Path Loss Exponent*

A variável n (*Path Loss Exponent*) é determinada a partir dos dados obtidos experimentalmente. Esta variável define o meio em termos das características de propagação, e só as medições efectuadas permitem observar e medir essas características. Para determinar esta variável, foram apenas considerados os pontos presentes na tabela abaixo:

Tabela 5.2 - Valores utilizados para o cálculo do modelo de propagação.

<i>Distância</i>	<i>Potência Recebida Média</i>
2	-66
3	-63
4	-73
5	-75
6	-69
7	-77
8	-82
9	-77
11	-83
13	-79
14	-77
15	-84
16	-82

Dos valores obtidos, foram excluídos para a determinação do modelo de propagação todas as distâncias em que o número de pacotes recebidos foi zero. Foram também retirados os valores obtidos a uma distância de 0,05 metros, que não foram obtidos com uma evolução linear como os restantes, e também porque era uma distância inferior à distância de referência (2 metros).

O método utilizado para determinar a variável n baseia-se no cálculo do declive da recta por regressão linear entre o logaritmo da distância e a potência medida (em dBm).

A expressão do modelo de propagação, não considerando a componente de *fading* X_σ , é dada por:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5.3)$$

A expressão apresentada corresponde à equação da recta no formato:

$$y = mx + b \quad (5.4)$$

Com a seguinte correspondência:

- $y = PL(dB)$
- $m = 10n$
- $x = \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$
- $b = PL(d_0)$

Os parâmetros a determinar são m e b , sendo para isso necessário obter os valores de $y = PL(dB)$ em função de $x = \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$. De seguida, apresenta-se a representação gráfica dos valores referidos.

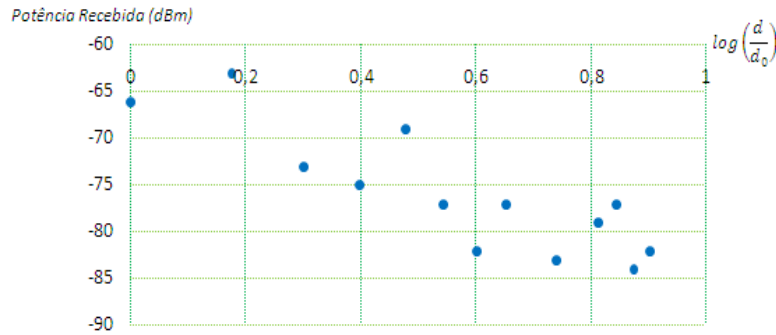


Figura 5.10 - Potência recebida em função de $\log\left(\frac{d}{d_0}\right)$.

Através da representação gráfica apresentada, verifica-se que é possível traçar uma recta por entre os vários pontos. Essa recta de regressão pode ser obtida através do método dos Mínimos Quadrados, cujo modelo matemático considerando a equação geral da recta $y = mx + b$ é o seguinte:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{declive da recta de regressão} \quad (5.5)$$

e

$$b = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} = \bar{y} - b \bar{x} \quad \text{ordenada na origem} \quad (5.6)$$

n, nestas expressões, corresponde ao número de amostragens obtidas, que neste caso, foram 13.

Aplicando as expressões anteriores, obtêm-se os seguintes valores:

- $m = -19,999$
- $b = -64,65$

Com estes valores, a equação da recta para os vários pontos medidos obtida por regressão linear é:

$$y = -19,999x - 64,65 \quad (5.7)$$

com um Coeficiente de Determinação igual a :

$$R^2 = 0,736 \quad (5.8)$$

obtido pela seguinte equação:

$$R^2 = \frac{(\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (5.9)$$

Este coeficiente, que pode variar entre 0 e 1, determina a qualidade da regressão, e quanto mais próximo da unidade, maior será a validade da regressão. Neste caso, o valor obtido atribui uma qualidade de cerca de 73% à regressão obtida.

A seguir representa-se a ilustração gráfica da recta obtida assim como a sua posição relativamente aos valores medidos.

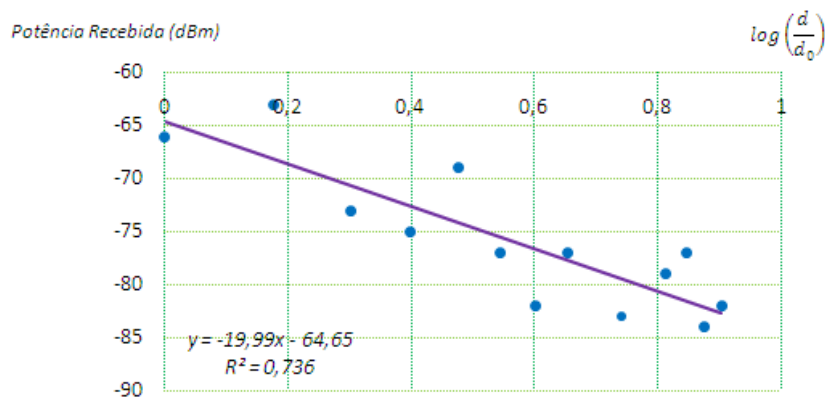


Figura 5.11 - Recta obtida por regressão linear.

Após ter sido determinado o declive da recta ($m = -19,999$) e a ordenada na origem ($b = -64,65$), pode-se determinar as variáveis $PL(d_0)$ e n do modelo de propagação (5.3). Sabendo que:

- $b = PL(d_0)$
- $m = 10n$

Logo,

- $PL(d_0) = -64,65$
- $n = -1,9999$

O valor de n (*Path Loss Exponent*) obtido é aproximadamente 2, o valor aplicado no modelo de Espaço Livre.

Pelo valor obtido para n , é possível induzir que, para o cenário apresentado, não é aplicável o modelo de dois raios (*Two-Ray Model*), que tem um valor de $n = 4$ a partir de determinada distância [Ber00]. Podem ser consideradas duas hipóteses para este facto:

- A altura das antenas era insuficiente;
- O piso do cenário de execução dos testes, devido à sua irregularidade, tinha um efeito muito dispersivo.

5.2.5.2. Componente de *Shadowing Fading*

A variável presente no modelo de propagação *Log-Normal Shadowing*, que contempla a irregularidade do ambiente de propagação, assim como a não-isotropidade da cobertura da antena, é X_σ . Esta variável representa a incerteza da medição, o conjunto dentro do qual a potência recebida pode oscilar mantendo as mesmas características na rede. É uma variável aleatória de distribuição Gaussiana, expressa em dB, com média nula e desvio padrão σ . Para efeitos de modelo, vai-se considerar que o desvio em relação à equação linear deduzida na secção anterior é devido a esta componente, i.e. que:

$$X_\sigma = PL(dB) - \left(PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \right) \quad (5.10)$$

Pode escrever-se:

$$X_\sigma \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5.11)$$

o que significa que X_σ tem distribuição Gaussiana com média μ (que, no caso, é nula) e variância σ^2 .

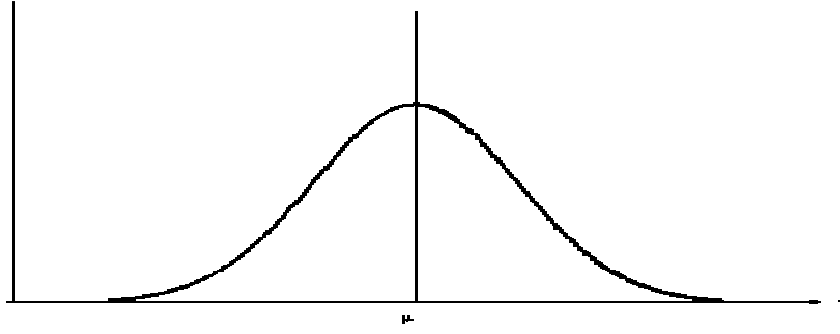


Figura 5.12 - Curva de densidade de probabilidade da distribuição Gaussiana.

Para se determinar o valor da variância amostral da componente aleatória do sinal, usou-se a seguinte expressão:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2 \quad (5.12)$$

na qual os valores X_n são as diferenças da potência recebida em relação aos respectivos valores na recta $-(PL(d_0) + 10n \log(\frac{d}{d_0}))$ e na qual a média \bar{X} é nula.

Logo:

$$S^2 = 11.53 \quad (5.13)$$

Assim, o desvio padrão amostral será igual a:

$$\sigma = \sqrt{S^2} = 3,4 \quad (5.14)$$

De acordo com [Gui97], o nível de confiança para a variância da potência X_σ pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\left[\frac{(N-1)S^2}{X_{N-1}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \frac{(N-1)S^2}{X_{N-1}^2\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)} \right] \quad (5.15)$$

à qual correspondem os seguintes valores, para um nível de confiança de 95% e para 12 graus de liberdade (e com base na tabela de valores críticos de X_{GL}^2):

$$X_{12}^2(0.975) = 4.40$$

$$X_{12}^2(0.025) = 23.34$$

Obtém-se assim o seguinte intervalo de confiança a 95% para a variância da potência do sinal recebido:

$$\sigma^2 \in [5,93; 31,44] \quad (5.16)$$

Com o valor obtido na equação 5.15, obtém-se o intervalo de confiança para σ :

$$\sigma \in [\sqrt{5,93}; \sqrt{31,44}] \quad (5.17)$$

logo

$$\sigma \in [2,44; 5,61] \quad (5.18)$$

5.2.5.3. Resultados Finais

Com base nos valores calculados nas duas secções anteriores, obtém-se o modelo de propagação em estudo. Com base nos cálculos efectuados, o modelo de propagação aplicável para o cenário de testes identificado tem os seguintes valores:

$$PL(dB) = -64,65 - 19,999 \log\left(\frac{d}{2}\right) + X_\sigma \quad (5.19)$$

onde X_σ tem uma média nula e um desvio padrão amostral de 3,4 dB (com a curva de densidade de probabilidade representada na figura 5.12), com um nível de confiança a 95% para a respectiva variância, entre 5,93 e 31,44.

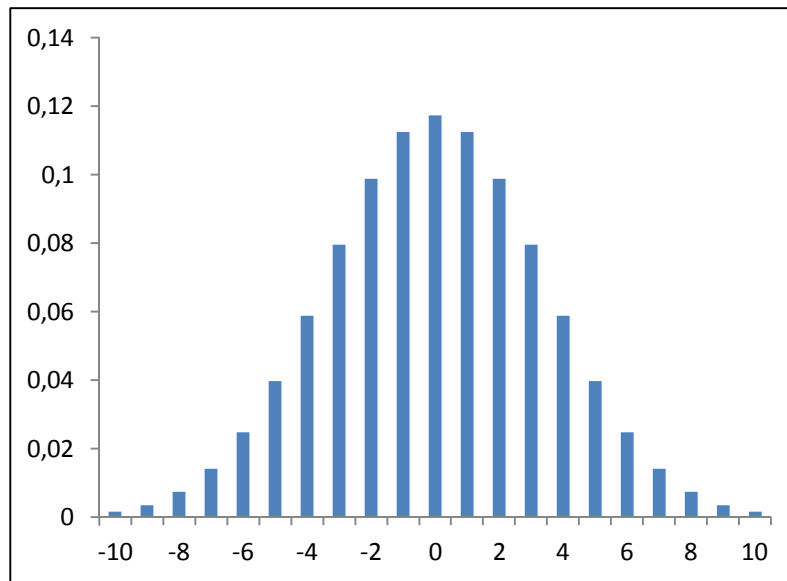


Figura 5.13- Curva de densidade de probabilidade de X_{σ} .

5.2.6. Débito

A quantidade de dados transmitidos foi também analisada neste trabalho, para que seja possível de proceder a comparações entre o débito real e o débito obtido através do simulador. Nas próximas secções são apresentados os cenários assim como os resultados obtidos para o modo de funcionamento assíncrono e síncrono.

5.2.6.1. Assíncrono

O débito assíncrono foi obtido pela contabilização de pacotes recebidos. O nó emissor procedeu ao envio de pacotes durante 1,5s. O receptor contabilizou os pacotes recebidos durante 1s após a recepção do primeiro pacote do emissor. Findo este período, foi enviada uma mensagem para o emissor com o número de pacotes recebidos.

Utilizou-se um tamanho do pacote variável, de forma a ser possível a análise do impacto que este parâmetro tem no *throughput*. Os valores de tamanho de pacote apresentados correspondem ao número de bytes de *payload*, não sendo contabilizado o tamanho do cabeçalho nem os metadados presentes nos pacotes CC2420.

Apresenta-se de seguida o gráfico do *throughput* obtido com base nas medições efectuadas e na implementação referida.

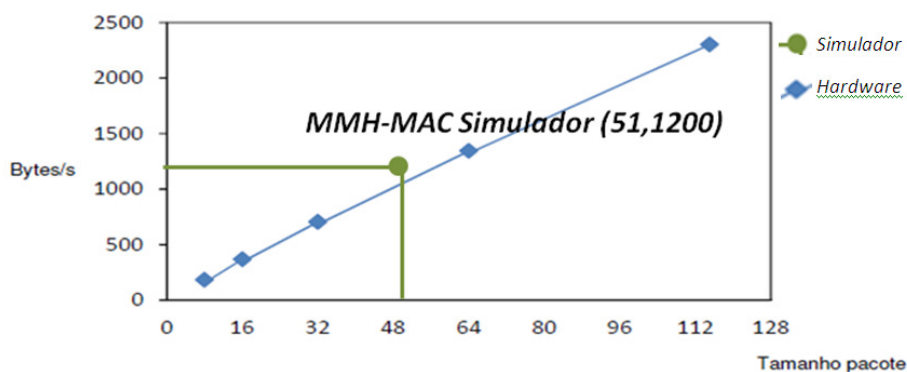


Figura 5.14 - *Throughput* em modo de funcionamento assíncrono.

Pela figura 5.14, observa-se que o débito cresce de forma aproximadamente linear com o tamanho do pacote. Pela figura 5.15, verifica-se que a razão entre o débito e o tamanho do pacote não é sempre a mesma, embora com uma variação pequena.

O gráfico da figura 5.14 contém também o valor obtido recorrendo ao simulador. Comparativamente, a diferença de *throughput* recorrendo ao simulador e ao *hardware* é pequena.

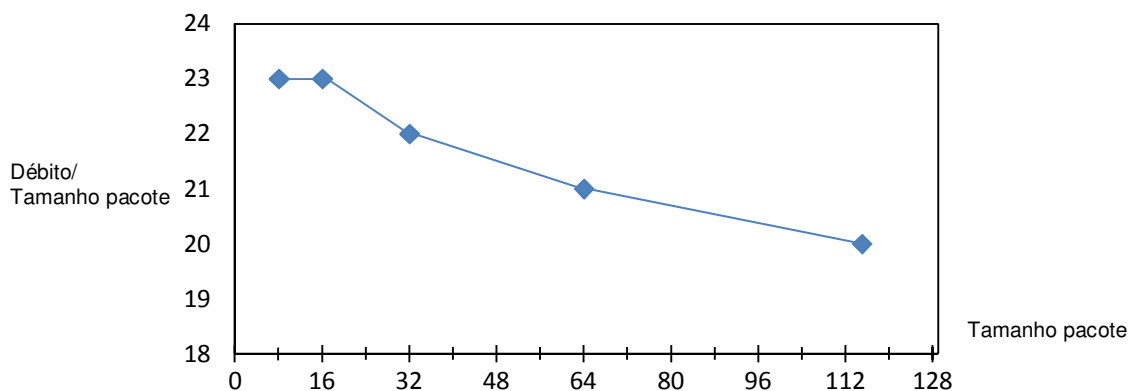


Figura 5.15 - Razão entre o débito e o tamanho do pacote.

Assim sendo, mediu-se o tamanho máximo do pacote que foi possível enviar, obtendo-se assim, o *throughput* máximo. O *payload* máximo obtido experimentalmente foi de 115 bytes, permitindo assim um *throughput* máximo de 2,3kB/s.

5.2.6.2. Síncrono

No modo síncrono, a implementação para a obtenção de *throughput* foi efectuada de forma semelhante. São enviados pacotes de um emissor para um receptor através de um *slot*

síncrono, medindo o número de pacotes recebidos durante um *slot*. Os valores obtidos estão representados na figura 5.14.

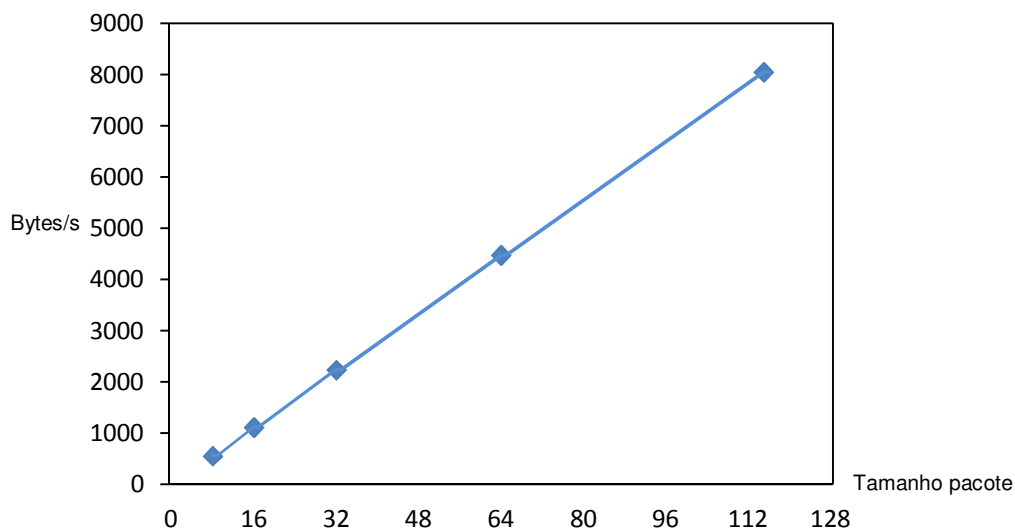


Figura 5.16 - *Throughput* em modo de funcionamento síncrono.

O número médio de pacotes recebidos por cada slot de 100ms foi de 7. Logo, o número total de pacotes por segundo é de 70. Então, o valor máximo de *throughput* é atingido quando o pacote tiver o tamanho máximo (115 bytes) que é 8050 bytes/s. Recorrendo ao simulador, e com pacotes de 35 bytes, obteve-se um *throughput* de 1,6kB/s.

5.2.6.3. Conclusão

Pela análise dos dados obtidos nas duas secções anteriores, verifica-se que o *throughput* do modo síncrono é muito superior ao do modo assíncrono. A adição de um período de espera no modo assíncrono condiciona o *throughput*. Esses períodos pretendem evitar colisões de pacotes, além de existir a necessidade de em cada pacote ser desencadeado o envio de preâmbulos e receber o respectivo pacote de confirmação.

CAPÍTULO 6.

Conclusões

Neste último capítulo resume-se todo o trabalho efectuado, expondo os resultados obtidos e procedendo a comparações com outros trabalhos. Também neste capítulo, são sugeridas algumas melhorias consideradas importantes para o estudo no âmbito desta dissertação, a realizar em trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como principal foco o estudo de um modelo de propagação aplicável a uma rede de sensores sem fios, num determinado cenário. Teve também como objectivo a realização e a análise de desempenho do protocolo MMH-MAC para os nós sensores TelosB. Este protocolo foi inicialmente realizado e testado recorrendo ao simulador TOSSIM [Ber10], pretendendo-se neste trabalho validar o protocolo com resultados obtidos recorrendo ao *hardware*.

Relativamente ao modelo de propagação, verificou-se que o modelo *Log-Normal Shadowing* reflecte as características do cenário testado. Foi medido um *path loss exponent* de 2, valor usado no modelo de Espaço Livre. Verificou-se que o modelo de dois raios, cujo *path loss exponent* é 4, não é aplicável para o cenário proposto. Tal pode estar relacionado com a altura das antenas, as quais se encontravam praticamente junto ao solo.

Foi possível identificar também as três zonas de recepção, assim como os efeitos que uma zona de transição pode ter na implantação de uma rede de sensores sem fios. Na zona de transição verificou-se que a perda de pacotes pode ser total, como aconteceu quando a distância entre o emissor e o receptor foi de 10 metros.

A implementação do protocolo MMH-MAC foi efectuada recorrendo à implementação efectuada em [Ber10] para correr no simulador TOSSIM. Foi necessário proceder a alterações no código para que ficasse funcional nos nós físicos TelosB. Foi necessário proceder à adição de tempos de espera entre a realização de tarefas, inclusive no envio de dados. Verificou-se assim que a emulação que o simulador TOSSIM faz dos nós TelosB não representa correctamente o *hardware* dos nós.

A taxa máxima de pacotes, por *slot* síncrono de 100 ms, obtida recorrendo ao simulador, foi de 11.84 pacotes, enquanto que recorrendo aos nós físicos, esse valor desceu para 7 pacotes.

O tamanho máximo do pacote influencia directamente o débito. O tamanho máximo de dados num pacote 802.15.4 com o rádio CC2420 é igual a 115 bytes. O valor máximo de débito foi obtido para o tamanho máximo de pacote, tendo-se medido um débito de 2,3 kB/s e de 8 kB/s respectivamente para o modo assíncrono e síncrono. Esta diferença prende-se com os períodos de espera necessários no modo assíncrono com o objectivo de “acordar” o destinatário da mensagem, assim como de evitar a colisão entre pacotes, o que é assegurado no modo síncrono através da alocação de *slots* privados. Embora a razão entre o débito e o tamanho dos pacotes não seja constante, a sua variação não foi significativa com o tamanho do pacote. Mas poderá ser mais significativa quando a distância emissor-receptor aumentar, ou quando existirem fontes de interferência.

6.2. Trabalho Futuro

O modelo de propagação obtido neste trabalho considerou a altura dos nós como sendo uma constante. A variação da altura dos nós relativamente ao chão, tanto do nó emissor como do nó receptor, poderá levar a novas conclusões. Nomeadamente, será interessante verificar se as características do modelo de propagação se mantêm as mesmas, ou até mesmo, se será aplicável o modelo de dois raios.

Neste trabalho verificou-se que o nó interferente não provocou impacto nas transmissões efectuadas. Os pacotes tinham todos o mesmo tamanho, 28 bytes de dados, podendo ser demasiado pequenos para causarem interferência. Assim, um novo estudo variando o tamanho dos pacotes poderia permitir analisar a partir de que tamanho se sente a interferência.

Bibliografia

[802.11] "802.11, IEEE Standard for Information technology-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications"; IEEE Computer Society; 2007.

[802.11k] "IEEE 802.11k-2008 — Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs"; IEEE Computer Society; 2008.

[802.15.4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers; "802.15.4, IEEE Standard for Information technology— Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs)"; IEEE Standard for Information technology; 2003.

[Aky02] Ian F. Akyildiz, Welljan Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci; "A Survey on Sensor Networks"; IEEE Communications Magazine, Volume: 40, Issue: 8, pp. 102-114; Agosto, 2002.

[And95] Jargen Bach Andersen, Theodore S. Rappaport, and Susumu Yoshida; "Propagation measurements and models for wireless communications channels"; IEEE Communications Magazine, Volume 33, Issue: 1, pp. 42-49; Janeiro, 1995.

[Baj99] Sandeep Bajaj, Lee Breslau, Deborah Estrin, Kevin Fall, Sally Floyd, Padma Haldar, Mark Handley, Ahmed Helmy, John Heidemann, Polly Huang, Satish Kumar, Steven McCanne, Reza Rejaie, Puneet Sharma, Kannan Varadhan, Ya Xu, Haobo Yu, and Daniel Zappala; "Improving Simulation for Network Research"; Technical Report 99-702b; University of Southern California, USA; Março, 1999.

[Ber00] Henry L. Bertoni; "Radio Propagation for Modern Wireless Systems"; Prentice Hall Professional Technical Reference; ISBN:0130263737; 1999.

[Ber07] Bernardo, L.; Oliveira, R.; Pereira, M.; Macedo, M.; Pinto, P.; "A Wireless Sensor MAC Protocol For Bursty Data Traffic"; Proceeding IEEE International Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun-PIMRC, Vol., pp. 1-5; Athens, Greece; Setembro, 2007.

[Ber10] Bernardo, L. Agua, H. Pereira, M. Oliveira, R. Dinis, R. Pinto, P.; "A MAC Protocol for Mobile Wireless Sensor Networks with Bursty Traffic"; Proceeding IEEE Wireless Communications and Networking Conf.-WCNC, Vol., pp. 1-6; Sydney, Australia; Abril, 2010.

[Bha05] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, Richard Han; "Mantis os: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms"; ACMKluwer Mobile Networks & Applications (MONET) Journal, Special Issue on Wireless Sensor Networks, Volume: 10 Issue: 4, pp. 563-579; Agosto, 2005.

[Bha94] Vaduvur Bharghavan, Alan Demers, Scott Shenker, Lixia Zhang; "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's"; Proceeding SIGCOMM '94 Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications; London, England; Agosto, 1994.

[Bue06] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, Richard Han; "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks"; Proceeding SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 307-320 ; Boulder, Colorado, USA; Novembro, 2006.

[CC2420] ChipCon Inc; "CC2420 Datasheet"; Disponível em <http://www.chipcon.com>.

[Cer05] Alberto Cerpa, Jennifer L. Wong, Louane Kuang, Miodrag Potkonjak, Deborah Estrin; "Statistical model of lossy links in wireless sensor networks"; Proceeding IPSN '05 Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, pp. 81-88; University of California, Los Angeles, USA; Abril, 2005.

[Dam03] Tijs van Dam, Koen Langendoen; "An Adaptive Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks"; Proceeding SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 171-180; Los Angeles, USA; Novembro, 2003.

[Dun04] Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, Thiemo Voigt; "Contiki-a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors"; Proceeding LCN '04 Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, pp. 455-462; Tampa, Florida USA; Novembro, 2004.

[Erg04] Sinem Coleri Ergen; ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary; Setembro, 2004.

[Fan03] A. Fanimokun and J. Frolik; "Effects of natural propagation environments on wireless sensor network coverage area"; Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory ; University of W. Virginia, Morgantown, USA; Março, 2003.

[Gan02] Deepak Ganesan, Bhaskar Krishnamachari, Alec Woo, David Culler, Deborah Estrin, Stephen Wicker; "Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-Power Wireless Sensor Networks"; Technical Report 02-0013; UCLA Computer Science Division; 2002.

[Gay03] David Gay, Philip Levis, David Culler, Eric Brewer; "nesC 1.1 Language Reference Manual"; Disponível em <http://nescc.sourceforge.net>; 2003.

[Gui97] Rui Campos Guimarães, José A. Sarsfield Cabral; "Estatística"; Mcgraw-hill; ISBN:9728298455; 1997.

[Gun07] V.C. Gungor, C. Sastry, Z. Song, R. Integlia; "Resource-Aware and Link-Quality-Based Routing Metric for Wireless Sensor and Actor Networks"; Proceedings of IEEE ICC 2007, pp. 3364-3369; Glasgow, UK; Junho, 2007.

[Hal09] Malka. N. Halgamuge, Toong-Khuan Chan, Priyan Mendis; "Experimental Study of Link Quality Distribution in Sensor Network Deployment for Building Environment"; Special Issue on Sensor Network for Building Monitoring: From Theory to Real Application, Electronic Journal of Structural Engineering, EJSE, pp 28-34; University of Melbourne, Australia; 2009.

[Hoi03] Amre El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, C. Enz, E. Le Roux; "WiseMAC, an Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Network"; Proceeding SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 302-303 ; Los Angeles, California, USA; Novembro, 2003.

[Hol06] Matthew M. Holland, Ryan G. Aures and Wendi B. Heinzelman; "Experimental Investigation of Radio Performance in Wireless Sensor Networks"; Wireless Mesh Networks, 2006. WiMesh 2006. 2nd IEEE Workshop on, pp. 140-150; Reston, Virginia, USA; Setembro, 2006.

[Hos10] Anwar Hossain, Mohammed Tarique, Rumana Islam; "Shadowing Effects on Routing Protocol of Multihop Ad Hoc Networks"; International Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing ISSN 0976-2205, Volume: 1; Issue: 1; Start page: 12; 2010.

[Jim09] Víctor P Gil Jiménez, Ana García Armada; "Field Measurements and Guidelines for the Application of Wireless Sensor Networks to the Environment and Security"; Sensors, Vol. 9, no. 12, pp. 10309-10325; Dezembro, 2009.

[Jov06] Milica D. Jovanovic, Goran Lj. Djordjevic; "TFMAC: Multi-channel MAC Protocol for Wireless Sensor Networks"; The 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services, TELSIKS, pp. 26-28; Nis, Serbia And Montenegro; Setembro, 2007.

[Jua02] Philo Juang, Hidekazu Oki, Yong Wang, Margaret Martonosi, LiShiuan Peh, and Daniel Rubenstein; "EnergyEfficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet"; Proceeding ASPLOS-X Proceedings of the 10th international conference on Architectural support for programming languages and operating systems; San Jose, CA, USA; Outubro, 2002.

[Kim08] Youngmin Kim, Hyojeong Shin, and Hojung Cha; "Y-MAC: An Energy-efficient Multi-channel MAC Protocol for Dense Wireless Sensor Networks"; Proceeding IPSN '08 Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks, pp. 53-63 ; St. Louis, Missouri, USA; Abril, 2008.

[Kot03] David Kotz, Calvin Newport, Chip Elliott; "The mistaken axioms of wireless network research"; Technical Report, TR2003-67; Dept. of Computer Science, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, United States; 2003.

[Kuh05] T. Kuhn, H. Klassen; "One Further Step Towards Realistic Simulations of Wireless Networks"; Technical Report 346/05; Department of Computer Science, University of Kaiserslautern, Germany; 2005.

[Lev03a] Philip Levis, Nelson Lee; "TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks"; Disponível em <http://www.cs.berkeley.edu>; 2003.

[Lev03b] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, David Culler; "TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications"; Proceeding SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems; Los Angeles, CA, USA; Novembro, 2003.

[Lev05a] Philip Levis, David Gay, Vlado H, Jan-hinrich Hauer, Ben Greenstein, Martin Turon, Jonathan Hui, Kevin Klues, Cory Sharp, Robert Szewczyk, Joe Polastre, Philip Buonadonna, Lama Nachman, Gilman Tolle, David Culler, Adam Wolisz; "T2: A Second Generation OS For Embedded Sensor Networks"; Technical Report TKN-05-007; Telecommunication Networks Group, Technische Universitat Berlin, Germany; 2005.

[Lev06] Philip Levis; "TinyOS Programmings"; Disponível em <http://csl.stanford.edu/~pal/pubs/tinyos-programming.pdf>; 2006.

[Lev07a] Philip Levis; "TinyOS 2.0 Documentation"; Disponível em <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/>; 2007.

[Lev07b] Philip Levis; "TEP111: message_t"; Disponível em <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep111.html>; 2007.

[Liu10] Linlan Liu, Jun Li, Jian Shu, Zhenhua Wu, Yebin Chen; "CCI-Based Link Quality Estimation Mechanism for Wireless Sensor Networks under Perceive Packet Loss"; Journal of Software, Volume 5, No. 4, pp. 387-395; Janeiro, 2010.

[Lop05] E. Egea-López, J. Vales-Alonso, A. S. Martínez-Sala, P. Pavón-Mariño, J. García-Haro; "Simulation Tools for Wireless Sensor Networks"; Summer Simulation Multiconference, SPECTS, pp. 2-9; Philadelphia, Pennsylvania, USA; Julho, 2005.

[Lop06] E. Egea-Lopez, J. Vales-Alonso, A. Martinez-Sala, P. Pavon-Mario, J. Garcia-Haro; "Simulation scalability issues in wireless sensor networks"; IEEE Communications Magazine, Volume 44, No. 7, pp. 64-73; Julho, 2006.

[Mai02] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, John Anderson; "Wireless sensor networks for habitat monitoring"; Proceeding WSNA '02 Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications, pp. 88-97 ; Atlanta, GA, USA; Setembro, 2002.

[Mal07] Michael Mallinson, Patrick Drane, Sajid Hussain; "Discrete Radio Power Level Consumption Model in Wireless Sensor Networks"; Proceedings of the Second International Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks, (SensorFusion); Pisa, Italy; 2007.

[Mica2] Crossbow Technology, Inc; "MICA2 868, 916 MHz"; Disponível em <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=174>; 2007.

[Micaz] Crossbow Technology, Inc; "MICAz 2.4GHz"; Disponível em <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=164>; 2007.

[Mos07] David Moss, Jonathan Hui, Philip Levis, Jung Il Choi; "TEP 126: CC2420 Radio Stack"; Disponível em <http://www.tinyos.net>; 2007.

[OmNet] OmNet++; "OMNeT++ Community Site"; Disponível em <http://www.omnetpp.org>; 2007.

[Pha04] Huan Pham, Sanjay Jha; "An Adaptive Mobility-Aware MAC Protocol for Sensor Networks (MS-MAC)"; Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, pp. 558-560; Fort Lauderdale, Florida, USA; Outubro, 2004.

[Pol04] Joseph Polastre, Jason Hill, David Culler; "Versatile low power media access for wireless sensor networks"; Proceeding SenSys '04 Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 95-107; Baltimore, MD, USA; Novembro, 2004.

[Pol05] Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler; "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research"; Proceeding IPSN '05 Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, pp. 364-369; UCLA, Los Angeles, California, USA; Abril, 2005.

[Que06] Ma.Victoria Que, Won-Joo Hwang; "Enhancing Topology Control Algorithms in Wireless Sensor Network Using Non-Isotropic Radio Models"; International Journal of Computer Science and Network Security, vol.6, no.8B, pp. 47-53; Julho, 2006.

[Rap02] Theodore S. Rappaport; "Wireless Communications: Principles and practice"; Second Edition, Prentice Hall; ISBN:0130422320; 2002.

[Rei04] Niels Reijers, Gertjan Halkes, Koen Langendoen; "Link layer measurements in sensor networks"; Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2004); Fort Lauderdale, USA; Outubro, 2004.

[Rhe05] Injong Rhee, Ajit C. Warriar, Lisong Xu; "Randomized Dining Philosophers to TDMA Scheduling in Wireless Sensor Networks"; Technical Report TR-2005-21; Computer Science Department, North Carolina State University, Raleigh, NC; 2004.

[Rhe08] Injong Rhee, Ajit Warriar, Mahesh Aia, Jeongki Min; "ZMAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks"; IEEE/ACM transactions, volume 16, Issue 3 pp. 511-524; Junho, 2008.

[Sad06] Babak Azimi-Sadjadi, Daniel Sexton, Ping Liu, Michael Mahony; "Interference Effect on IEEE 802.15.4 Performance"; Proceedings of 3rd International Conference on Networked Sensing Systems (INNS); Chicago, IL, USA; 2006.

[Sal07] M. Salajegheh, H. Soroush, A. Kalis; "HYMAC: Hybrid TDMA/FDMA Medium Access Control Protocol for Wireless Sensor Networks"; Proceedings of the 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1-5 ; Athens, Greece; Setembro, 2007.

[Soh99] K Sohrabi, B Manriquez, G J Pottie; "Near ground wideband channel measurement in 800-1000 MHz"; Proceedings of the 49th Vehicular Technology Conference (VTC) '99, pp. 571-574; Houston, TX; Maio, 1999.

[Sri06a] Kannan Srinivasan, Prabal Dutta, Arsalan Tavakoli, Philip Levis; "Understanding the causes of packet delivery success and failure in dense wireless sensor networks"; Proceeding SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 419-420 ; Boulder, CO, USA; Novembro, 2006.

[Sri06b] Kannan Srinivasan, Philip Levis; "RSSI is Under Appreciated"; Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006), pp. 41-45; Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA; Maio, 2006.

[Sun07] Sun Labs; "Sun Small Programmable Object Technology (Sun SPOT) Theory of Operation"; Disponível em <http://www.sunspotworld.com/docs/Purple/SunSPOT-TheoryOfOperation.pdf>; 2007.

[Tak01] Mineo Takai, Jay Martin, Rajive Bagrodia ; "Effects of wireless physical layer modeling in mobile ad hoc networks"; in MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, pp. 87-94; Outubro, 2001.

[TelosB] Crossbow Technology, Inc; "Telosb mote platform"; Disponível em <http://www.xbow.jp/TelosbCatalog.pdf>.

[The05] John Thelen, Daan Goense, Koen Langendoen; "Radio Wave Propagation in Potato Fields"; Proceedings of the First Workshop on Wireless Network Measurements; Venice, Italy; Fevereiro, 2005.

[Var01] Andras Varga; "The OMNeT++ discrete event simulation system"; Proceedings of the European Simulation Multiconference, pp. 319-324 ; Prague, Czech Republic; Junho, 2001.

[War03] B.A. Warneke; "Ultra-Low Energy Architectures and Circuits for Cubic Millimeter Distributed Wireless Sensor Networks"; PhD Dissertation; University of California, Berkeley, USA; Maio, 2003.

[Wer06] Geoffrey Werner-Allen, Jeff Johnson, Mario Ruiz, Jonathan Lees, and Matt Welsh; "Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network"; Proceedings 2nd European Workshop Wireless Sensor Networks (EWSN 05), IEEE Press, 2005; Istanbul, Turkey; Fevereiro, 2005.

[Woo03] Alec Woo, Terence Tong, David Culler; "Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks"; Proceedings of the 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pp. 14-27; Los Angeles, USA; Novembro, 2003.

[Xia93] H. H. Xia, H. L. Bertoni, L. R. Maciel, A. Lindsay-Stewart, and R. Rowe; "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications"; IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 41, issue 10, pp. 1439-1447; Outubro, 1993.

[Ye04] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estrin; "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks"; Journal IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) Volume 12 Issue 3, pp. 493-506; Junho, 2004.

[Ye06] Wei Ye, Fabio Silva, John Heidemann; "Ultra-Low Duty Cycle MAC with Scheduled Channel Polling"; Proceeding SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, pp.321-334 ; Boulder, Colorado, USA; Outubro, 2006.

[Zam07] Marco Zúñiga Zamalloa, Bhaskar Krishnamachari; "An Analysis of Unreliability and Asymmetry in Low-Power Wireless Links"; ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Volume 3, Issue 2, Article No. 7; Junho, 2007.

[Zho06] Gang Zhou, Tian He, Sudha Krishnamurthy, John A. Stankovic; "Models and Solutions for Radio Irregularity in Wireless Sensor Networks"; Journal ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN) TOSN Homepage archive Volume 2 Issue 2, pp. 221-262; Maio, 2006.

[Zun04] Marco Zuniga, Bhaskar Krishnamachari ; "Analyzing the transitional region in low power wireless links"; First IEEE International Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks (SECON); Santa Clara, CA, USA; Outubro, 2004.